

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**"JULIO DE MESQUITA FILHO"**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS FARMACÊUTICAS**  
**CÂMPUS DE ARARAQUARA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE BIOMATERIAIS E BIOPROCESSOS**  
**MESTRADO PROFISSIONAL**

**VIABILIDADE PARA A PRODUÇÃO DE BIOCARVÃO DE RESÍDUOS**  
**AGROINDUSTRIAIS USANDO SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA**  
**(SIG)**

**LUCIANO BRUNELLI LAMARI MAIA**

**ORIENTADORA: Profa. Dra. Danielle Goveia**

**ARARAQUARA - SP**

**2020**

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JULIO DE MESQUITA FILHO"  
FACULDADE DE CIÊNCIAS FARMACÊUTICAS  
CÂMPUS DE ARARAQUARA

VIABILIDADE PARA A PRODUÇÃO DE BIOCARVÃO DE RESÍDUOS  
AGROINDUSTRIAIS USANDO SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA  
(SIG)

LUCIANO BRUNELLI LAMARI MAIA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos (Mestrado Profissional), Área de Biomateriais, Bioprocessos, Bioprodutos da Faculdade de Ciências Farmacêuticas, UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos.

ORIENTADORA: Profa. Dra. Danielle Goveia

ARARAQUARA - SP

2020



---

**M217v** Maia, Luciano Brunelli Lamari.  
Viabilidade para a Produção de Biocarvão de Resíduos Agroindustriais Usando Sistema de Informação Geográfica (SIG) / Luciano Brunelli Lamari Maia. – Araraquara: [S.n.], 2020.  
167 f. : il.

Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade Estadual Paulista. "Júlio de Mesquita Filho". Faculdade de Ciências Farmacêuticas. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos. Área de Biomateriais, Bioprocessos, Bioprodutos.

Orientadora: Danielle Goveia.

1. Biocarvão. 2. Sistema de Informação Geografia (SIG). 3. Logística de resíduos agroindustriais. I. Goveia, Danielle, orient. II. Título.

Para Rô, Jú e Sô pela paciência em esperar,  
Pra Dona Ieda, pelo apoio e orações.

## AGRADECIMENTOS

À **Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Danielle Goveia** pela orientação, apoio e confiança, mesmo quando foi necessário recomeçar tudo do zero.

Ao **Prof. Dr. Augusto Batagin Netoe** à **Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Marília da Silva Bertolini**, pelas orientações e correções durante a banca de qualificação.

Ao **Anderson Machado dos Santos**, do Suporte Acadêmico, pela ajuda nas atividades no Laboratório da UNESP.

Ao professor **Francisco Vasconcelos de Araujo (Xixo)**, pelas dicas sobre Geoprocessamento

Ao colega de curso **Pedro Luis Colturato** pelas dicas que ajudaram a chegar até aqui.

A todos os mantenedores do Colégio Objetivo de Itapeva, por permitirem o uso do espaço da escola para os experimentos de solo.

À Faculdade de Ciências Sociais e Agrárias de Itapeva (FAIT) pela parceria na utilização dos laboratórios de análise de solos

À CAPES: O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

Ao Campus Experimental de Itapeva pelo acesso à infraestrutura, cessão de materiais e equipamentos para a produção e análise dos dados.

À seção de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos, Unesp-Campus Araraquara, em especial às servidoras Claudia Lúcia Molina, Denise Daré Hatanaka e Aniele Vilella.

Meus agradecimentos, de coração.

*“É preciso lembrar que ninguém escolhe o ventre, a localização geográfica, a condição socioeconômica e a condição cultural para nascer. Nasce onde o acaso determinar. Por isso, temos que cuidar de todos aqueles que estão em todos os recantos deste planeta.”*  
**(Aziz Ab'Saber)**

## RESUMO

Pesquisas realizadas em diferentes países indicam o potencial do biocarvão como um produto ecologicamente adequado para projetos de melhoramento da capacidade produtiva dos solos agrícolas, ou ainda, em trabalhos de remediação ambiental de solos contaminados por insumos e defensivos agrícolas ou por metais potencialmente tóxicos. Visando oferecer uma ferramenta para otimização de tempo e recursos científicos em pesquisas nessa área, o presente trabalho propõe um modelo de Sistema de Informação Geográfica (SIG), tendo como referência espacial o Estado de São Paulo, correlacionando as variáveis: produção de resíduos agroindustriais, classes de solo e necessidades ecológicas regionais. Não se encontrou, até o momento, nenhum sistema de informação sobre biocarvão que oferecesse esse padrão de respostas, indicando o caráter inovador e importante da presente proposta. O SIG foi elaborado sob uma arquitetura simples e flexível, que permite reproduzir a metodologia em outros Estados da Federação. Através dos mapas dinâmicos, foi possível constatar que a disponibilidade de resíduos passíveis de conversão em biocarvão em uma região não é necessariamente proporcional ao seu volume de produção agropecuária. No Estado de São Paulo as microrregiões de Tatuí, Botucatu, Piracicaba, Sorocaba, Itapetininga e Itapeva apresentam geração de resíduos pouco expressiva, apesar da elevada produção agrícola local. São José do Rio Preto, São Joaquim da Barra e Ribeirão Preto são as áreas com maior potencialidade para fornecimento de matéria prima para conversão em biocarvão. Essas áreas estão rodeadas por diferentes categorias de latossolos, bastante propícios ao emprego do biocarvão. Do ponto de vista de análise ambiental, os mapas evidenciam uma faixa de contaminações diversas que coincidem com a área de recarga do Aquífero Guarani. Os focos mais críticos são as microrregiões de Itapeva, Avaré, Piracicaba, Limeira e Campinas. Nessas áreas, o biocarvão pode ser uma alternativa em projetos de descontaminação de solos, entretanto, a disponibilidade local de resíduos agrícolas é pouco expressiva, indicando a necessidade de se investigar outras fontes para a obtenção de material ligno-celulósico adequado a essa finalidade.

**Palavras chave:** biocarvão, sistema de informação geografia (SIG), logística de resíduos agroindustriais.

## ABSTRACT

Research carried out in different countries points out the potential of biochar as an ecologically suitable product for projects of productive capacity improvement of agricultural soils, or even, in environmental remediation works for soils contaminated by agricultural inputs or by potentially toxic metals. In order to optimize time and scientific resources, this work proposes a Geographic Information System (GIS) model to guide such research in Brazil, having as spatial reference the State of São Paulo, correlating the following variables: agro-industrial waste production, soil classes and regional ecological needs. No information system on biochar, which offers this pattern of responses, indicating the innovative and important character of this proposal has been found, so far. The GIS has been developed under a simple and flexible architecture, which allows reproducing the methodology in other States of the Federation. Through dynamic maps, it was possible to verify that the availability of residues that can be converted into biochar, in a region, is not necessarily proportional to its volume of agricultural and livestock production. The micro regions of Tatuí, Botucatu, Piracicaba, Sorocaba, Itapetininga and Itapeva, in the State of São Paulo, have little waste generation, despite the high local agricultural production. São José do Rio Preto, São Joaquim da Barra and Ribeirão Preto are the areas with the greatest potential for supplying raw materials for conversion into biochar. These areas are surrounded by different categories of oxisols, where biochar is a good alternative for productive optimization. From the point of view of environmental analysis, the maps show a range of diverse contaminations that coincide with the recharge area of the Guarani Aquifer. The most critical focuses are the micro-regions of Itapeva, Avaré, Piracicaba, Limeira and Campinas. In these areas, biochar can be an alternative in soil decontamination projects, however, the local availability of agricultural residues is not very significant, indicating the need to investigate other sources for obtaining ligno-cellulosic material suitable for this purpose.

Keywords: biochar, geography information system (GIS), agro-industrial waste logistics.

## LISTADE FIGURAS

|                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1–Esquema representativo de componentes de um Sistema Integrado G                                                             | 21  |
| Figura 2 - SIG com “arquitetura hierarquizada” X “arquitetura flexível”                                                              | 22  |
| Figura 3 - SIG baseado em Imagens                                                                                                    | 23  |
| Figura 4– Cristalização do carbono sob diferentes temperaturas de pirólise                                                           | 31  |
| Figura 5 - Distribuição de latossolos no Brasil                                                                                      | 41  |
| Figura 6 - Ocorrência de Latossolos no Estado de São Paulo                                                                           | 42  |
| Figura 7 - Ocorrência de Argissolos no Estado de São Paulo                                                                           | 44  |
| Figura 8 - Distribuição de neossolos no território brasileiro                                                                        | 45  |
| Figura 9 - Ocorrência de Neossolos no Estado de São Paulo                                                                            | 46  |
| Figura 10- Ocorrência de Gleissolos no Estado de São Paulo                                                                           | 48  |
| Figura 11- Ocorrência de Nitossolo no Estado de São Paulo                                                                            | 49  |
| Figura 12– Ocorrência de Organossolos no Estado de São Paulo                                                                         | 50  |
| Figura 13 – Ocorrência de Cambissolos no Estado de São Paulo                                                                         | 51  |
| Figura 14– Ocorrência de Espodossolos no Estado de São Paulo                                                                         | 52  |
| Figura 15 – Unidades Geomorfológicas do Estado de São Paulo                                                                          | 57  |
| Figura 16– Evolução do Índice de Qualidade dos Aterros de Resíduos no Estado de São Paulo                                            | 62  |
| Figura 17– Modelo da planilha de produção agropecuária e produção total de resíduos dentro da arquitetura do SIG                     | 91  |
| Figura 18– Modelo da Tabela de Atributos dentro do QGIS para a produção dos mapas de “volume de produção” e “volume de resíduos”     | 92  |
| Figura 19– Modelo do sistema de legenda do mapa no software QGIS                                                                     | 93  |
| Figura 20- Projeto do mapa temático “Volume de produção de cana de açúcar por microregião do Estado de São Paulo”                    | 93  |
| Figura 21 – projeto de mapa sobre “ Resíduos totais de agroindústria disponíveis para produção de biocarvão no Estado de São Paulo”. | 94  |
| Figura 22 - Resíduos disponíveis do cultivo do algodão (porcentagem em relação a produção total).                                    | 96  |
| Figura 23– Resíduos disponíveis do cultivo da cana de açúcar (porcentagem em relação à produção total).                              | 99  |
| Figura 24- Resíduos disponíveis do cultivo de arroz (porcentagem em relação à produção total).                                       | 100 |
| Figura 25– Resíduos disponíveis do cultivo de café (porcentagem em relação à produção total)                                         | 102 |
| Figura 26 – Resíduos disponíveis do processamento da laranja para suco (em relação à produção total).                                | 104 |
| Figura 27 – Resíduos disponíveis de granjas (esterco de porco em Kg por animal e cama de frango em Kg por 100 animais)               | 106 |
| Figura 28 – Resíduos disponíveis da silvicultura (pinus e eucalipto / porcentagem em relação à produção total)                       | 107 |
| Figura 29- Projeto do mapa para análise de potencialidades do biocarvão em diferentes classes de solo.                               | 114 |
| Figura 30 - Legendas de adequação do biocarvão em diferentes categorias de solo                                                      | 114 |
| Figura 31– Áreas consideradas como potencial desnecessário ou desconhecido para aplicação do biocarvão                               | 115 |
| Figura 32- Modelo de mapa das potencialidades de aplicação do biocarvão nos arredores de Itapeva na escala 1:100.000                 | 116 |

|                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 33- Modelo de mapa das potencialidades de aplicação do biocarvão nos arredores de Arararquara na escala 1:500.000 | 116 |
| Figura 34–Modelo da planilha para cálculo do IC, ICP e ICFF.                                                             | 119 |
| Figura 35– Áreas com alto Índice de Concentração de Pesticidas (ICP).                                                    | 120 |
| Figura 36– Áreas com alto Índice de Concentração de Fertilizantes Fosfáticos (ICFF).                                     | 121 |
| Figura 37 – Exemplo do mapa combinando informações com diferentes potenciais áreas de risco de contaminação de solo.     | 122 |
| Figura 38– Micro-regiões administrativas do Estado de São Paulo                                                          | 126 |
| Figura 39 – Comparativo de mapas de produção e resíduos                                                                  | 126 |
| Figura 40– Modelo de produção do mapa de potencialidades do biocarvão em relação ao solo                                 | 127 |
| Figura 41 - Utilização de Agrotóxicos por Municípios no Estado de São Paulo (2006)                                       | 129 |
| Figura 42 - Índice de Concentração de Pesticidas no Estado de São Paulo                                                  | 131 |
| Figura 43- Índice de Concentração de Fertilizantes Fosfáticos no Estado de São Paulo                                     | 133 |
| Figura 44– Exibição combinada de uso de zonas de alto uso de Pesticidas e alto uso de Fertilizantes Fosfáticos.          | 135 |
| Figura 45 – Acréscimo da camada “aterros sanitários irregulares”.                                                        | 135 |
| Figura 46– Áreas com maiores problemas de contaminação do solo coincidentes com a Área de Recarga do Aquífero Guaraní.   | 136 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 - Diferença nas condições de pirólise.....                                                                                        | 28  |
| Tabela 2 - Fonte primária de dados sobre produção agroindustrial brasileira.....                                                           | 68  |
| Tabela 3 - Cálculo da taxa de resíduos potenciais do algodão para conversão<br>em biocarvão = 320%.....                                    | 96  |
| Tabela 4 - Cálculo da taxa de resíduos potenciais da cana de açúcar para conversão<br>em biocarvão = 22,5%.....                            | 98  |
| Tabela 5 - Cálculo da taxa de resíduos potenciais do arroz para conversão<br>em biocarvão = 19%.....                                       | 100 |
| Tabela 6 - Cálculo da taxa de resíduos potenciais do café para conversão em<br>biocarvão = 50%.....                                        | 101 |
| Tabela 7 - Cálculo da taxa de resíduos potenciais da laranja para conversão em<br>biocarvão = 10%.....                                     | 107 |
| Tabela 8 - Cálculo da taxa de resíduos potenciais para conversão em<br>biocarvão, Galináceo 700g p/ animal e Suíno – 180Kg por animal..... | 105 |
| Tabela 9 - Cálculo da taxa de resíduos potenciais para conversão de madeira<br>em biocarvão = 10%.....                                     | 107 |
| Tabela 10 - Proporção entre volume e massa da madeira.....                                                                                 | 108 |
| Tabela 11 - Microrregiões com ICP de alta discrepância.....                                                                                | 131 |
| Tabela 12 – Microrregiões com ICP ligeiramente acima da média .....                                                                        | 132 |
| Tabela 13 - Microrregiões com ICFF de alta discrepância.....                                                                               | 133 |
| Tabela 14 - Microrregiões com ICFF ligeiramente acima da média.....                                                                        | 134 |

## LISTA DE QUADROS

|                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Quadro 1 - Modelo de questionamento do SIG .....                                                    | 17  |
| Quadro 2 - Plantas fitorremediadoras para descontaminação por metais<br>potencialmente tóxicos..... | 37  |
| Quadro 3 - Potencialidades do biocarvão em diferentes categorias de solos.....                      | 112 |
| Quadro 4 - Sistema de legendas do mapa de potenciais do biocarvão .....                             | 113 |

## LISTA DE ABREVIATURAS

CAD – *Computer Aided Design*

CTC – Capacidade de troca catiônica

GEEs – Gases de Efeito Estufa

GUI – *Graphical User Interface*

IAC – Instituto Agrônomo

ICP – Índice de Concentração de Pesticidas

ICFF – Índice de Concentração de Fertilizantes Fosfáticos

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

OMS – Organização Mundial da Saúde

PAM – Produção Agrícola Municipal

PEVS – Produção Extrativa Vegetal e Silvicultura

SGBD – Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados

SIDRA – Sistema IBGE de Recuperação Automática

SiBCS – Sistema Brasileiro de Classificação de Solos

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SIRGAS – Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

SRC – Sistema de Referência de Coordenadas

TPIs – Terras Pretas de Índio

UTM – *Universal Transversa de Mercator*

## SUMÁRIO

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO                                                                                                          | 12 |
| 2. OBJETIVOS                                                                                                           | 16 |
| 2.1. Objetivo Geral                                                                                                    | 16 |
| 2.2. Objetivos Específicos                                                                                             | 16 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA                                                                                               | 17 |
| 3.1. Sistemas de Informação Geográfica (SIG)                                                                           | 17 |
| 3.1.1. Origem histórica e aplicação dos Sistemas de Informações Geográficas                                            | 18 |
| 3.1.2. Estrutura de um SIG                                                                                             | 20 |
| 3.1.3. Análise Sistemática de Dados Espaciais e Arquitetura do SIG                                                     | 21 |
| 3.2. O biocarvão                                                                                                       | 25 |
| 3.2.1. As “Terras Pretas do Índio” e a história do biocarvão                                                           | 25 |
| 3.2.2. Tipos de biocarvão e propriedades                                                                               | 27 |
| 3.2.3. Interações físico-químicas do biocarvão                                                                         | 30 |
| 3.2.4. Possibilidades de aplicação do biocarvão em tratamento de solos contaminados por metais potencialmente tóxicos. | 32 |
| 3.2.5. Biocarvão no auxílio de processos de fitorremediação                                                            | 35 |
| 3.3. Elementos pedológicos e seus processos de interação                                                               | 38 |
| 3.3.1. Latossolos                                                                                                      | 41 |
| 3.3.2. Argissolos                                                                                                      | 43 |
| 3.3.3. Neossolos                                                                                                       | 45 |
| 3.3.4. Gleissolos                                                                                                      | 47 |
| 3.3.5. Nitossolos                                                                                                      | 48 |
| 3.3.6. Organossolos                                                                                                    | 49 |
| 3.3.7. Cambissolos                                                                                                     | 50 |
| 3.3.8. Espodossolos                                                                                                    | 51 |
| 3.4. Contaminação por metais potencialmente tóxicos                                                                    | 52 |
| 3.4.1 Efeitos dos metais potencialmente tóxicos na saúde humana e no meio ambiente                                     | 53 |
| 3.4.2. Contaminação do solo no Estado de São Paulo por metais potencialmente tóxicos                                   | 56 |
| 3.4.3. Descarte de resíduos sólidos no Estado de São Paulo e contaminação por metais potencialmente tóxicos.           | 60 |
| 3.4.4. Contaminação do solo por atividades mineradoras                                                                 | 62 |
| 3.4.5. Contaminação do solo por efluentes e despejos agrícolas e industriais                                           | 64 |
| 4. METODOLOGIA                                                                                                         | 67 |
| 4.1. Complexidade dos estudos ambientais                                                                               | 67 |

|                                                                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2. Mapeamento dos resíduos agroindustriais                                                                                    | 68  |
| 4.3. Levantamentos cartográficos do Estado de São Paulo                                                                         | 68  |
| 5. RESULTADOS                                                                                                                   | 70  |
| 5.1. Levantamento sobre as características dos resíduos agroindustriais gerados no Estado de São Paulo                          | 70  |
| 5.1.1. Algodão                                                                                                                  | 71  |
| 5.1.2. Cana de açúcar                                                                                                           | 72  |
| 5.1.3. Grãos: arroz                                                                                                             | 77  |
| 5.1.4. Grãos: café                                                                                                              | 77  |
| 5.1.5. Grãos: milho                                                                                                             | 78  |
| 5.1.6. Grãos: soja e feijão                                                                                                     | 80  |
| 5.1.7. Laranja                                                                                                                  | 81  |
| 5.1.8. Pecuária: bovinos                                                                                                        | 83  |
| 5.1.9. Pecuária: granjas de galináceos e suínos                                                                                 | 84  |
| 5.1.10. Pinus e Eucalipto                                                                                                       | 87  |
| 5.2. Mapeamento dos resíduos agroindustriais                                                                                    | 89  |
| 5.3. Estimativa de resíduos agroindustriais disponíveis para a geração de biocarvão                                             | 94  |
| 5.3.1. Algodão                                                                                                                  | 95  |
| 5.3.2. Cana de açúcar                                                                                                           | 97  |
| 5.3.3. Grãos: arroz                                                                                                             | 99  |
| 5.3.4. Grãos: café                                                                                                              | 273 |
| 5.3.5. Grãos: milho, feijão e soja                                                                                              | 102 |
| 5.3.6. Laranja                                                                                                                  | 103 |
| 5.3.7. Pecuária: granjas de galináceos e suínos.                                                                                | 104 |
| 5.3.8. Pinus e eucalipto                                                                                                        | 106 |
| 5.4. Mapeamento dos potenciais de solo para projetos de biocarvão                                                               | 109 |
| 5.5. Mapeamento para aplicação de biocarvão em projetos de remediação dos solos contaminados por metais potencialmente tóxicos. | 117 |
| 5.6. Layout e disponibilização em ambiente virtual                                                                              | 122 |
| 6. DISCUSSÃO                                                                                                                    | 125 |
| 6.1. O SIG aplicado à análise de produção agrícola e produção de resíduos.                                                      | 125 |
| 6.2. O SIG aplicado à análise de solos                                                                                          | 127 |
| 6.3. O SIG aplicado à análise ambiental                                                                                         | 128 |
| 7. CONCLUSÃO                                                                                                                    | 137 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 8. REFERÊNCIAS                 | 139 |
| 9. BASE DE DADOS CARTOGRÁFICOS | 155 |
| 10. ANEXOS                     | 156 |

## 1. INTRODUÇÃO

Qualquer matéria orgânica ligno-celulósica ao ser submetida a altas temperaturas, sob baixo fornecimento de oxigênio, passará por alterações químicas e físicas na estrutura de suas moléculas, em um processo denominado carbonificação ou ainda, pirólise, dependendo do calor aplicado e da velocidade das reações (LEHMANN, 2007).

Historicamente, há evidências de que povos de diferentes regiões do planeta, com destaque para os habitantes da floresta equatorial amazônica, tinham o hábito de carbonificar os resíduos de sua produção alimentar (cascas, restos de folhas e carcaças de animais) e despejar esse material de volta ao solo. Consciente ou não, essa prática resultava em melhoramentos consideráveis das propriedades desses solos, a ponto de permanecerem ainda perceptíveis, mesmo que muitos anos depois desses grupos humanos deixarem de viver nessas terras (WAYNE, 2012).

Apesar de serem práticas antigas, foi apenas no início do século XXI que elas passaram a ganhar maior atenção no meio científico. Além dos arqueólogos, agrônomos, engenheiros químicos e engenheiros de bioprocessos começaram a se questionar e tentar reproduzir tais métodos para produção de insumos naturais ao solo, constatando sua eficácia com aumentos significativos na estrutura radicular das plantas, produtividade e resistência dessas aos períodos de maior rigor climático. Nasce assim, dessas pesquisas, o conceito de biocarvão ou biochar como uma alternativa ecológica para dar um destino adequado a resíduos cujo descarte no meio ambiente tende a ser problemático (LEHMANN; JOSEPH, 2009).

Pesquisas subsequentes trouxeram a luz para outras possibilidades de emprego do biocarvão, além da melhoria agrícola. Esses materiais podem ser empregados em projetos de tratamento de solos contaminados por metais potencialmente tóxicos e agrotóxicos (LAGE JUNIOR, 2016); ajudam a manter o carbono estável no solo, diminuindo sua emissão atmosférica como gás de efeito estufa (KALINKE, 2016); funcionam como fonte energética de baixa emissão de carbono e trazem, ainda, como subproduto, o bio-óleo, com um conjunto de outras aplicações diversas (LEHMANN; PETTER, 2007).

Diversas pesquisas com biocarvão, embora tragam resultados satisfatórios em simulação laboratorial, pouco avançam na prática ou não despertam interesse de

utilização no mercado. Isso se deve ao fato de que a aplicação em larga escala e o redirecionamento dos resíduos das atividades humanas para soluções ambientalmente sustentáveis depende de interesses de mercado, ou então, de ações de governantes por meio de políticas públicas, que muitas vezes só se concretizam quando elas retornam, de algum modo, em visibilidade junto à opinião pública.

Fatores locais que podem inibir o interesse em projetos de biocarvão são:

- Desproporção de volume: quando a carbonificação do resíduo gera volumes muito abaixo ou muito acima do que a região necessita para a aplicação nos projetos;
- Distância: quando um tipo de biocarvão obtido numa localidade não apresenta aplicação nos solos do entorno e precisa ser levado a regiões distantes, os custos de armazenamento e transporte inviabilizam seu emprego;
- Outras aplicações: diversos resíduos já apresentam formas mais consolidadas de reaproveitamento, como por exemplo, direcionamento da biomassa para ração animal.

É necessário sair da bancada para as necessidades do mercado, atendendo as necessidades sociais emergenciais, dando subsídios ao desenvolvimento e a adoção de ferramentas metodológicas que possibilitem a aplicação do biomaterial para a solução de problemas da sociedade, pois a pesquisa aplicada é algo importante a ser considerado.

O desenvolvimento eco-sustentável já vem se mostrando há tempos como uma dessas necessidades emergenciais, principalmente no que tange à agroindústria. Produzir alimentos é hoje, certamente, uma das atividades que mais impacto traz ao ambiente, seja pelo elevado consumo de recursos hídricos, ocupação de áreas anteriormente formadas por matas nativas ou pela volumosa carga de resíduos que lança no ecossistema. Por outro lado, mesmo se considerarmos ações no sentido de corrigir e readequar os hábitos alimentares das diferentes, há uma pressão crescente por comida no mundo todo, onde o Brasil tem um papel importante de abastecimento global. Assim, a ciência assume cada vez mais responsabilidade para encontrar meios que tornem a agricultura ainda mais produtiva, conciliados a técnicas que equacionem seus impactos ambientais (RIBEIRO; JAIME, 2017).

No caso das pesquisas bioquímicas com o biocarvão e suas diversas aplicabilidades, o ponto chave para que evoluam da bancada para projetos operacionais com resultados práticos observáveis, reside no respeito à eficácia logística do processo, o que é, em síntese, produto de uma análise geoespacial bem fundamentada, que integre harmonicamente o local de produção dos resíduos dentro dos volumes esperados à usina de processamento do biocarvão e o local de aplicação desse material.

A proposta do presente projeto reside na criação de uma metodologia para construção de um SIG (Sistema de Informação Geográfica) que sirva de orientador a novas pesquisas dentro desse meio. O estudo foi realizado a partir de dados da atividade agroindustrial do Estado de São Paulo, porém a metodologia é reprodutível em outros Estados da Federação, simples e flexível, permitindo adaptação às especificidades geográficas de cada região.

A revisão de literatura do projeto inicia-se com a abordagem sobre construções de SIGs e estruturação de arquiteturas de dados geoespaciais, desde a integração com as bases de fornecimento de conteúdo, a articulação dos dados entre diferentes aplicativos e as metodologias de visualização e comunicação com o usuário. Em seguida, estão as definições sobre o biocarvão, uso, tipos, aplicações e interações com o solo.

A partir do levantamento sobre as categorias de solos mais relevantes no Estado de São Paulo, tendo como referência principal o mapeamento de solos do IAC (Instituto Agrônomo), foi desenvolvida uma análise classificatória das formas como o biocarvão pode interagir em cada categoria.

Foi feito também o levantamento sobre a contaminação ambiental por metais potencialmente tóxicos no Estado de São Paulo e o levantamento de estudos que viabilizem o uso de biocarvão como alternativa para o tratamento ambiental de solos contaminados e em processos de fitorremediação, tendo por base os principais casos de ocorrência no território paulista.

Detectadas as principais aplicações do biocarvão, é possível relacionar o quão próximo está o problema da solução, identificando a biomassa disponível para a produção do biocarvão e o local a ser aplicado, seja para a melhoria do solo, seja para o auxílio na remediação de áreas contaminadas. Assim, usando a base de dados, fez-se o levantamento dos principais produtos da agroindústria paulista, (EMBRAPA; IBGE), sendo algodão, café, cana de açúcar, laranja, madeira (pinus e

eucalipto), pecuária (bovinos, galináceos e suínos), milho, soja, feijão e arroz, onde se buscou estimar o volume de biomassa residual que cada uma dessas atividades produz, ainda sem aplicação econômica.

Entende-se por biomassa residual toda sobra de material orgânico resultante de uma atividade agrícola e pecuária, cujo descarte no meio ambiente exige procedimentos adequados e, por vezes, onerosos. A agroindústria moderna procura, cada vez mais, encontrar soluções para o encaminhamento desses resíduos, seja aproveitando-os como insumo dentro da própria área de produção, seja criando novos materiais com aplicações que transformem o resíduo numa nova receita de venda. Mesmo com todas essas pesquisas, ainda há resíduos sem saída adequada, e convertê-los em biocarvão pode representar uma alternativa econômica aos produtores rurais.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Elaborar as bases para funcionamento de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) de apoio a pesquisas na área de biocarvão.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Levantar os principais resíduos do setor agroindustrial do Estado de São Paulo e suas possibilidades de conversão em biocarvão.
- Estabelecer chaves de correlações entre as classes de solo do Estado de São Paulo e suas interações com o biocarvão em aplicações diversas.
- Levantar os principais focos de contaminação de solos por metais potencialmente tóxicos no Estado de São Paulo com possibilidade de uso do biocarvão como auxiliar nos projetos de saneamento ambiental.
- Estruturar a arquitetura operacional de um Sistema de Informação Geográfica que integre os dados levantados sobre solos e tratamento com biocarvão, com a possibilidade de interação colaborativa com outros pesquisadores.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Sistemas de Informação Geográfica (SIG)

Os Sistemas de Informações Georreferenciadas ou Sistemas de Informações Geográficas (SIG), do inglês, *Geographic Information System* (GIS) são um conjunto de tecnologias que permitem a análise com dados espaciais, racionalizando a compreensão dos processos de ocupação do espaço físico. Suas ferramentas principais são o Processamento Digital de Imagens, a Geoestatística e o Georreferenciamento dos dados com base em um sistema de coordenadas, mais usualmente, as coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator ) (SILVA, 2003).

Segundo Moreira, (2003), o que caracteriza um SIG é a capacidade de interagir informações espaciais provenientes de diferentes fontes computacionais, elaborando-se algoritmos que permitam a consulta rápida, a plotagem sobre uma representação gráfica do espaço e a possibilidade de novas inferências quanto a compreensão da realidade a partir da leitura dessas imagens.

Silva, (2003), aponta que, basicamente, um SIG é composto por uma fonte de dados (proveniente de uma ou mais plataformas) e que consiga responder ao usuário de modo rápido, com fácil interpretação, às perguntas sobre um tema de estudo, conforme é apresentado no Quadro 1:

Quadro 1 - Modelo de questionamento do SIG

| AÇÃO        | PERGUNTA                                                               |
|-------------|------------------------------------------------------------------------|
| Localização | O que está em ( <i>local</i> )?                                        |
| Condição    | Onde está?                                                             |
| Tendência   | O que mudou (ou mudará) em determinada localidade?                     |
| Rota        | Qual o melhor caminho?                                                 |
| Padrão      | Qual a variável dominante em determinada localidade?                   |
| Simulação   | Como será a ocorrência de um evento em determinada localidade?         |
| Modelamento | Que modificações acontecerão com determinado evento em uma localidade? |

Fonte: adaptado de Silva (2003)

Um SIG não precisa atender a todos esses tipos de análise, mas pelo menos a uma delas. Outras funções atribuídas a um SIG são: produzir mapas de maneira mais rápida e barata, permitir experimentos com diferentes representações geográficas, acelerar os processos de acesso, comparação e quantificação de fenômenos espaciais (SILVA, 2003).

### **3.1.1. Origem histórica e aplicação dos Sistemas de Informações Geográficas**

Segundo Bolfe (2011), o conceito de análise sistemática de dados espaciais remonta ao séc. XIX, no exemplo clássico do médico inglês John Snow que, em 1854, ao plotar sobre um mapa de Londres os locais de ocorrência de cólera durante uma fase de surto, conseguiu associar essas posições com os hábitos de consumo de água da população a um poço de onde os infectados recolhiam água para beber. Analisando a água desse poço, conseguiu determinar o vetor causador da doença.

Ao criar uma sistemática de registro e catálogo das ocorrências, mapeá-las, selecionar possíveis variáveis de relação causa e efeito, John Snow estabeleceu as bases do que se convencionaria chamar posteriormente de Análise Sistemática de Dados Espaciais (BOLFE, 2011).

A Análise Sistemática de Dados Espaciais iniciou-se assim juntamente com o nascimento da Epidemiologia e da Geografia Médica. Ela partia do princípio de que a compreensão de diferentes fenômenos, bem como a compreensão de suas causas, pode se tornar muito mais clara quando os dados são posicionados sobre bases cartográficas (SILVA, 2003). No caso referido, do médico John Snow, se ele observasse apenas os endereços dos infectados, mas não os posicionando sobre o mapa, demoraria muito mais tempo ou talvez não conseguisse delimitar o epicentro de onde irradiava o foco contaminante.

Conforme as tecnologias de informática e da astronavegação por satélites orbitais foram se desenvolvendo ao longo das décadas de 1960 a 1980, os dois campos de conhecimento apresentam intersecção na Análise Sistemática de Dados Espaciais, dando origem à expressão Sistema de Informação Geográfica.

Silva, (2003), aponta que a evolução da Análise Geográfica Integrada para o mundo da informatização de dados e concepção moderna de um GIS se deu em 1962, quando a empresa *Tomlinson Group* do Canadá passou a oferecer um serviço de armazenamento de dados em formato digital, capaz de realizar operações de

sobreposição de polígonos, criar novas áreas poligonais sobre os mapas e sintetizar os dados de imagens em listas e relatórios estatísticos de modo imediato ao usuário.

Os anos 90 marcam a difusão de projetos de SIG, incorporados por entidades governamentais e grandes corporações empresariais, nas finalidades mais diversas: prospecção mineral, monitoramento ambiental, fiscalização imobiliária, vigilância militar, apoio a sistemas de tráfego entre outros (BOLFE, 2011).

Nessa mesma década, uma discussão que ganhou relevância quanto às orientações de construção dos SIGs estava na modelagem de representação cartográfica dos dados, se utilizando de representações matriciais ou de representações vetoriais.

Na representação matricial, a unidade fundamental é um polígono regular denominado pixel, onde as informações da área de abrangência do pixel são convertidas em um único valor, baseado na média de incidência dentro dessa área. No modelo matricial a manipulação de dados é bem mais clara, mas sua análise é limitada. Esse é o formato de representação das imagens obtidas por sensores orbitais, compondo as primeiras fases de desenvolvimento do geoprocessamento (MOREIRA, 2003).

Na representação vetorial, os dados são posicionados por um conjunto de coordenadas x e y, delimitando um ponto, linha ou área geométrica com padrão interno homogêneo. Em geral, esse é o produto final do geoprocessamento, quando as informações espaciais diversas das representações matriciais são sintetizadas e agrupadas dentro dessas formas geométricas de caráter vetorial (MOREIRA, 2003).

Se na década de 90 os SIGs representavam tecnologias altamente complexas, cuja clientela restringia-se ao uso governamental, científico acadêmico ou às grandes corporações empresariais, no século XXI a evolução dos aparelhos de *smartphones* com recursos integrados de Geoposicionamento, abriu uma janela gigantesca para a criação de SIGs em que a entrada de dados, sua interface e a representação de respostas são cada vez mais acessíveis ao público leigo.

Somado aos satélites orbitais, às estações de coleta de dados ou centros de pesquisa, vamos encontrar, nos milhões de celulares espalhados com cada usuário, uma rede contínua e pulverizada de informações geoposicionadas, coletadas voluntariamente (LOTI, 2007). Grandes sistemas de monitoramento de trânsito das metrópoles operam hoje com dados fornecidos por usuários de aplicativos de roteamento. Centros de previsão meteorológica podem aumentar a precisão dos

seus boletins do tempo valendo-se de informações dadas pelos agricultores em tempo real, via mapas dinâmicos (*WebMaps*), enquanto usuários podem interagir com as informações apresentadas de modo muito mais consciente (LOTI, 2007).

A palavra de ordem dos novos SIGs é “interação”, onde plataformas com bases de dados diferentes “conversam” entre si, aumentando sua eficácia. O cliente que acessa um aplicativo de *delivery*, sem perceber, está passando dados para outro aplicativo de publicidade, que irá buscar de acordo com a localização e interesses do cliente, quais anúncios serão redirecionados para o seu *smartphone*.

Com o maior poder de processamento dos atuais sistemas de computação, e a possibilidade de que boa parte desses dados sejam armazenados na nuvem, a discussão sobre representação vetorial ou matricial se torna menos relevante, com a disponibilização de aplicativos que conseguem trabalhar, converter e manipular integralmente esses dois modelos de representação. Silva, (2003), afirma que as questões em debate nos novos SIGs passam a ser outras, como níveis temáticos, a filosofia do banco de dados orientada ao objeto, modelos hierárquicos, modelagem em 3D ou incorporação de Inteligência Artificial ao sistema.

### 3.1.2. Estrutura de um SIG

Os SIGs funcionam basicamente à partir da interligação harmônica de cinco componentes: a interface de trabalho, o sistema de entrada de dados, a consulta e análise de dados, a visualização e plotagem e o Banco de Dados Geográficos (MOREIRA, 2003). Segundo o autor, esses cinco componentes (Figura 1) são entendidos por:

**Interface:** é composta por uma base de integração de dados, permitindo seus fluxos do banco de dados ao sistema de análise, formando assim a ponte principal entre as informações que entram e as que saem do sistema.

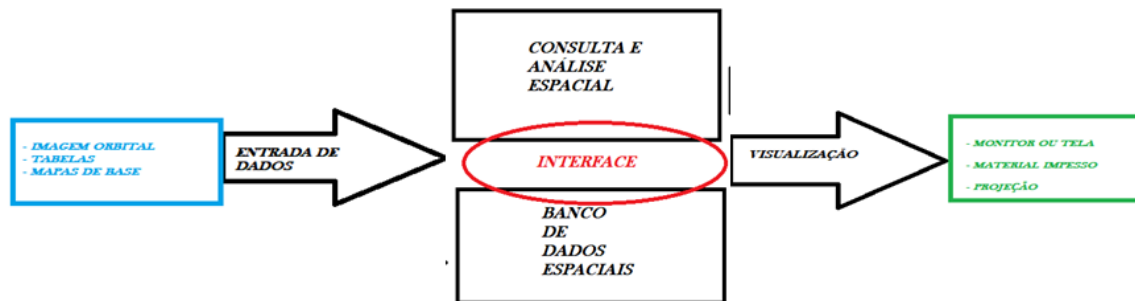
**Entrada de dados:** corresponde a todas as fontes dos dados que alimentam o SIG, ou seja, primeira etapa em que as informações chegam ao sistema. É composto pelas imagens de satélite, os mapas e imagens já processados por outros SIGs e as tabelas onde são digitadas as informações.

**Consulta e análise de dados:** são os softwares e aplicativos que direcionam uns aos outros os dados inseridos no componente de entrada.

**Visualização e plotagem:** correspondem às ferramentas que permitem ao operador do sistema enxergar o produto de operações do SIG, como os monitores de vídeo, as telas sensíveis ao toque e as impressoras.

**Banco de Dados Geográficos:** também chamado de base de dados, são os sistemas de arquivamento das informações, cada vez mais dispersos na nuvem. O que particulariza o Banco de Dados Geográficos de um SIG é que a maioria de suas informações está atrelada a um código de posicionamento espacial ou endereçamento geográfico.

Figura 1–Esquema representativo de componentes de um Sistema Integrado G



Fonte: adaptado de Moreira (2003)

Em geral, pela própria particularidade dos SIGs, que trabalham com volumes muito grande de informações, esses bancos podem estar divididos entre diferentes agentes dos setores públicos e privados que se compartilham pela rede virtual. Assim, um SIG pode manipular dados que estão sob a responsabilidade de órgãos tão distintos como IBGE, Embrapa e Sebrae e mesmo assim, apresentar respostas uniformes, trazendo uma falsa impressão de que provêm todos de uma mesma base.

### 3.1.3. Análise Sistemática de Dados Espaciais e Arquitetura do SIG

A subjetividade da Análise Sistemática de Dados Espaciais, em todas as etapas, não deve ser negligenciada, uma vez que tanto os sistemas sensores de satélites orbitais quanto as imagens digitais produzidas pelos aplicativos de processamento, não deixam de ser tentativas de quantificar elementos geográficos, que muitas vezes não se expressam numericamente no mundo real, mas são

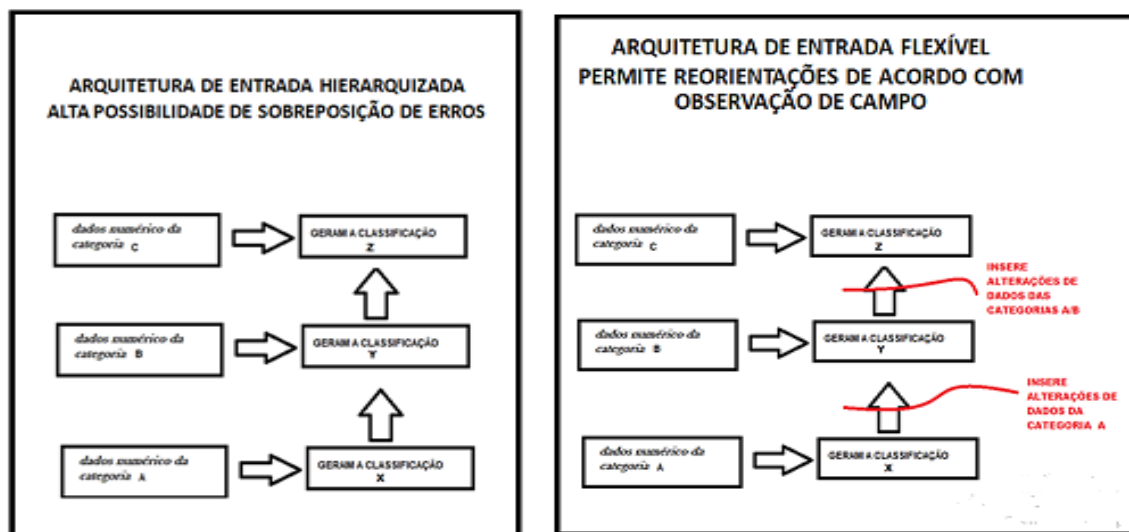
produtos de abstrações em escalas de valores, criadas no decorrer da história humana (LUCHIARI, 2005).

A seleção entre as inúmeras possibilidades de quantificação dos fenômenos geográficos, assim como na elaboração dos algoritmos de síntese, depende de uma boa dose de experiência e de conhecimento do espaço em abordagem, por parte da equipe de profissionais envolvidos na elaboração de um SIG.

Como os dados passam por processamentos estatísticos, essa subjetividade na categorização, classificação ou separação pode ser amplificada e gerar grandes distorções nos resultados finais, o que exige a contínua verificação e realimentação dos dados com base em nova análise (SILVA, 2003).

Essa reflexão é importante por mostrar a necessidade de que a arquitetura do Sistema de Informação Geográfica não seja demasiadamente fechada em níveis hierárquicos de classificação, conforme demonstrado na Figura 2, de modo a impedir a alteração de dados analíticos entre as camadas de processamento.

Figura 2 - SIG com “arquitetura hierarquizada” X “arquitetura flexível”

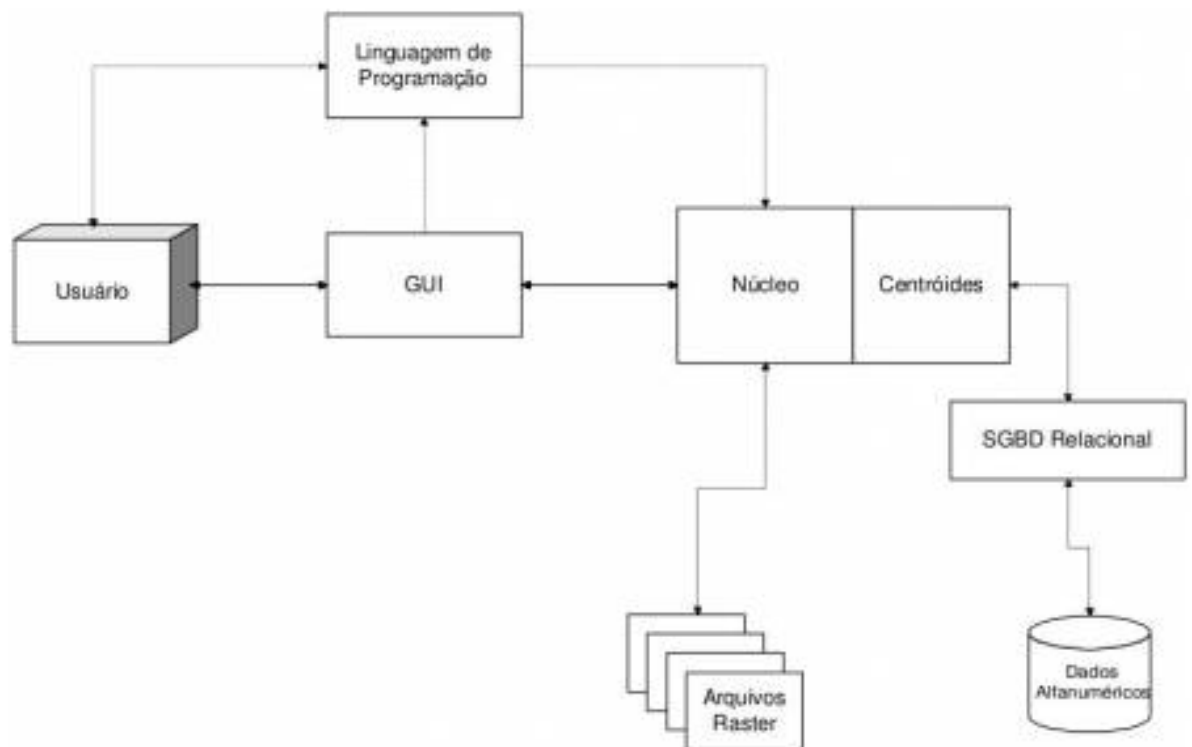


Fonte: o autor

Ao elaborar a Arquitetura de um SIG, os planejadores do Sistema devem começar delimitando seus objetivos finais e todos os bancos de dados que poderá ter acesso para alimentar o sistema. A partir disso, desenhará um fluxograma das informações dentro do sistema e escolher as ferramentas estatísticas e os sistemas de manipulação de imagens que são adequados (SILVA, 2003)

Nesse fluxograma, esquematizado na Figura 3, a base inicial é o Banco de Dados, composto por dados alfanuméricos (palavras associadas a números de endereçamento, classificação, ordenação ou classificação) e dados puramente gráficos (mapas, imagens orbitais, arquivos raster e arquivos vetoriais) (FERREIRA, 2005).

Figura 3 - SIG baseado em imagens



Fonte: Ferreira (2005)

O Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados (SGBD) são aplicativos otimizados para armazenar e recuperar dados, em geral, não gráficos.

Aplicativos gráficos como o CAD (*Computer Aided Design*) conseguem armazenar, acessar e manipular arquivos gráficos usando relativamente baixa quantidade de memória, mas são informações unicamente visuais, com pouca ou nenhuma topologia (SILVA, 2003).

Os aplicativos do tipo GIS operam justamente a integração dos dados Gráficos com o SGBD e o GUI (*Graphical User Interface*). Esses aplicativos podem ter sistemas próprios para gestão dos dados gráficos ou, mais comumente, trabalham como extensões dos aplicativos de processamento gráfico. São exemplos de

Softwares desse tipo o ArcGIS, SAGA, Spring, ESRI, MapInfo etc. Por ser um sistema aberto gratuito, com uma boa comunidade de usuários no meio acadêmico e capaz de executar as tarefas mais importantes na concepção desse projeto, o QGIS foi a ferramenta escolhida como aplicativo de geoprocessamento para o presente trabalho.

Atualmente, boa parte dos projetos de Análise Sistemática de Dados Espaciais trabalha dentro da concepção de terceira geração de SIGs (“centros de dados geográficos” ou “bibliotecas geográficas digitais”), com grandes bases de dados acessados pelas redes remotas (interface via WWW).

Aqui, o compartilhamento com outras instituições exige requisitos de interoperabilidade, uma vez que necessita acessar informações produzidas em distintos Sistemas de Informação Geográfica (FERREIRA, 2005).

Um aspecto importante que definirá toda a estrutura do fluxo de operações do SIG é ter em mente que tipo de produto final, em termos de mapa gráfico, o SIG buscará oferecer ao usuário e quais ações ele poderá exercer sobre esse mapa: visualizar em escalas diferentes, solicitar representação de classes de fenômenos (pontuais, lineares ou áreas), modelagem 3D, produzir simulações, fundir dados etc.

Silva, 2003, afirma que dentro de um SIG, os mapas podem ser distinguidos em 4 modelos, de acordo com suas possibilidades e aplicações:

Os mapas observacionais são imagens meramente descritivas da distribuição de um fenômeno (clima, solo, fluxos econômicos, entre outros) que podem ser ampliados ou movidos pela ação do cursor, sem oferecer informações a mais além daquilo que de imediato apresenta.

Os mapas analíticos permitem algumas formas de manipulação dentro das informações já contidas em sua estrutura de dados: imagens em falsa cor, modelos de elevação digital que permite a transição de uma visualização 2D para 3D em diferentes ângulos, modelamentos numéricos por inserção de dados etc.

Os mapas fundidos trazem resultados gráficos de operações algébricas com outras fontes de dados (tabelas, gráficos e dados gráficos básicos) ou pontos que fazem link com outras plataformas.

Os mapas integrados resultam do cruzamento de dois ou mais mapas que resultam imagens síntese através da manipulação estatística entre eles por modelos lógicos (simultaneidade booleana, possibilidade fuzzy, probabilidade bayesiana).

### **3.2. O biocarvão**

Segundo Lenmann e Joseph (2009) o biocarvão é um produto rico em carbono obtido quando uma biomassa ou material orgânico sofre decomposição térmica em condições limitadas de fornecimento de oxigênio. Basicamente, podemos entendê-lo como qualquer material ligno-celulósico submetido a condições de temperaturas elevadas, mas de modo controlado (pirólise), evitando-se sua incineração por completo, através do mínimo fornecimento de oxigênio para combustão. Os mesmos autores ponderam que os termos carvão vegetal (charcoal) e biocarvão (biochar) são distintos, embora por vezes refiram-se ao mesmo material, por que enquanto o carvão vegetal resulta da carbonificação de variedades restritas de árvores para ser usado como fonte energética, o biocarvão pode ser obtido de uma amplitude muito maior de materiais, que vão da própria madeira até o lodo de esgoto ou qualquer tipo de resíduo vegetal, em processos mais controlados de temperatura e tempo de carbonificação, visando criar produtos para aplicações específicas de beneficiamento agrícola ou tratamento de solos.

Pesquisas realizadas em diferentes países apontam para o potencial desse material em projetos de melhoramento dos solos para uso agrícola, aumentando expressivamente sua capacidade produtiva, ou ainda, em trabalhos de saneamento ambiental, especialmente em áreas contaminadas por metais potencialmente tóxicos, seja como auxiliar na ação de técnicas fitorremediadoras de descontaminação de solos ou como redutor/neutralizador em ambientes contaminados por metais potencialmente tóxicos, através das suas propriedades de adsorção físico-química. As etapas de carbonificação desse material permitem também a integração com sistemas de produção energética de baixa emissão de carbono na atmosfera e obtenção de um subproduto, o bio-óleo, que pode ser empregado ainda em outras atividades.

#### **3.2.1. As “Terras Pretas do Índio” e a história do biocarvão**

Wayne (2012) afirma que as técnicas para a produção do biocarvão e o conhecimento quanto a sua eficácia no aumento da produtividade agrícola já eram feitas por povos pré-colombianos, fato constatado (mas de certo modo, não

compreendido na época), pelo geólogo James Orton em 1870, ao observar manchas localizadas em meio a Floresta Amazônica de solos com aspecto cinza escuro, de alta fertilidade e padrões bioquímicos bem distintos do entorno. Recentemente, esses solos passaram a receber a denominação de Terras Pretas de Índio (TPIs) ou Terra Preta Arqueológica.

De acordo com Petter *et al.* (2016), as TPIs apresentam maior reatividade da fração húmica do solo em função da oxidação parcial das estruturas aromáticas policondensadas, aumentando a disponibilidade de Cálcio, Fósforo e Potássio e reduzindo os teores de acidez potencial (Hidrogênio + Alumínio).

O material resultante adquire propriedades químicas que, ao ser distribuído sobre as camadas superficiais do solo, contribui para que ele tenha significativas melhorias nutricionais, fluxo-hídricas e biológicas (CUNHA *et al.*, 2009).

Embora os estudos sobre os métodos de produção do biocarvão e seus resultados diversos a partir do emprego de diferentes materiais fontes seja bastante rico na atualidade, os mecanismos de interação desse material com o meio ambiente ainda exigem aprofundamento para sua melhor compreensão.

Atualmente, as pesquisas sobre o biocarvão concentram-se principalmente nas diversas possibilidades de matérias primas das quais podem ser obtidos, priorizando-se aquelas que comumente seriam levadas a descarte como resíduo sólido orgânico. Há assim, pesquisas sobre as propriedades de biocarvão de bagaço de cana, bagaço de laranja (MAIA; GATTAIS; MORAIS, 2017), casca de pinhão (LAGE JUNIOR, 2016) podas de arborização urbana (MAIA, 2011), lama de lodo, (ZHAO, 2019) etc. Além disso, tais estudos visam também as diversas possibilidades energéticas que o processo de pirólise abre durante sua aplicação na produção do biocarvão.

Considerando-se o Brasil como um dos expoentes do agronegócio internacional e que essa atividade é uma das principais responsáveis pela produção contínua de biomassa vegetal, o biocarvão atua como uma alternativa ambientalmente sustentável, no seu produto final, como uma possibilidade de descarte adequado de resíduos orgânicos. Segundo Lehmann e Joseph (2009), o biocarvão é um produto rico em carbono obtido à partir de biomassas submetidas a decomposição térmica em condições limitadas de fornecimento de oxigênio, gerando uma alternativa custo-efetiva limpa para a reciclagem de grandes quantidades de resíduos agrícolas e também algumas categorias de resíduos urbanos industriais.

### 3.2.2. Tipos de biocarvão e propriedades

Maia (2011), afirma que qualquer fonte de biomassa se presta à produção de biocarvão, mas diferenças químicas como teores de lignina, extrativos, celulosas, hemicelulosas e diferenças na morfologia desses materiais, impactam nas propriedades finais do produto. Também é importante ressaltar que as condições da pirólise, como tempo de combustão e temperatura, são fundamentais na definição dos resultados. O produto obtido apresentará assim características bastante particulares, como porosidade, superfície específica, pH, capacidade de troca iônica, recalcitrância etc. Com isso, as respostas agronômicas e ambientais obtidas, quando da aplicação do biocarvão no solo, são diversas. O tipo de solo e a cultura explorada também devem ser levados em conta, pois é sobre esse substrato que o biocarvão irá interagir.

Segundo Lage Junior (2016), os mecanismos reacionais envolvidos na pirólise são complexos devido à formação de centenas de produtos intermediários, mas que, de maneira esquemática, esses processos químico-físicos podem ser resumidos em:

- Transferência de calor com o aumento da temperatura das partículas e a retirada da umidade. Assim, diferentes ligações químicas começam a ser quebradas, liberando-se de voláteis que levam a rearranjos na matriz da biomassa, formando *char* inicial;
- Transferência de calor dos voláteis mais quentes para as partículas ainda não pirolisadas. Ocorrendo a condensação de parte dos voláteis, há a possibilidade de formação de alcatrão;
- Reações secundárias catalisadas pela superfície quente do *char* (autocatalíticas). Assim, os voláteis podem ser fragmentados em moléculas ainda menores, reagindo com a matriz sólida e formando o *char*, ou então se condensando com aumento da fração líquida.

Sob o processo de pirólise da matéria orgânica, obteremos assim três produtos principais, uma fase líquida (bio-óleo), uma fase sólida (biocarvão ou biochar) e uma fase gasosa (gases não condensáveis), cada uma delas com usos e aplicações específicas nas áreas energética, agronômica e para pesquisa de bioprocessos ambientais.

Kalinke (2015) demonstra a síntese dos diferentes tipos de pirólise com seus respectivos rendimentos em relação às condições experimentais adotadas (Tabela 1). O tempo de pirólise que pode variar de segundos a horas e a temperatura de pirólise, que pode variar entre 300°C a 1000°C trazem resultados distintos quanto à proporção de bio-óleo, biocarvão e gases gerados, além de influenciar nos padrões de cristais de carbono que se realinham no material com o acréscimo de temperatura.

Tabela 1 - Diferença nas condições de pirólise

| <b>Pirólise</b> | <b>Temperatura</b> | <b>Tempo de residência</b> | <b>Bio-óleo</b> | <b>Biocarvão</b> | <b>Gases</b> |
|-----------------|--------------------|----------------------------|-----------------|------------------|--------------|
| <b>Rápida</b>   | 300 a 1.000° C     | Segundos                   | 75%             | 12%              | 13%          |
| <b>Moderada</b> | Aprox. 500° C      | Segundos/<br>Minutos       | 50%             | 20%              | 30%          |
| <b>Lenta</b>    | 100 a 1.000° C     | Minutos/<br>Horas          | 30%             | 35%              | 35%          |

Fonte: KALINKE, Cristiane (2015) adaptado de Lehmann e colaboradores, Ringer e colaboradores, Wright e colaboradores

Entre os benefícios advindos do uso corretamente dimensionado do biocarvão no solo, destacam-se:

- Estabilização do nível de decomposição mineral e aumento da capacidade em reter nutrientes, (LEHMANN, 2007);

- Aumento significativo da capacidade de retenção de água, sobretudo em solos de textura arenosa devido à sua porosidade e, conseqüentemente, a sua alta superfície específica, (CARVALHO *et al.*, 2014);
- Aumento da atividade microbiana durante a degradação abiótica e biótica do biocarvão, (HAMMES ; SCHMIDT, 2009) (MACHADO, 2012);
- Redução das emissões de óxido nitroso ( $N_2O$ ), principalmente daqueles provenientes de adubações nitrogenadas, (PETTER *et al.*, 2016);
- Queda significativa na emissão de carbono em forma de gases de efeito estufa, sendo ele armazenado em formas mais estáveis (MADARI *et al.*, 2006);
- Aumento da sorção e redução da dessorção do herbicida diuron, reduzindo assim o potencial de lixiviação e, conseqüentemente, menor contaminação das águas subsuperficiais (PETTER *et al.*, 2016);

Cada vez mais estudos científicos mostram, mundialmente, que o biocarvão é também um recurso promissor como um “remediador ambiental”, contribuindo para mitigação das mudanças climáticas ao ajudar a retenção de carbono no solo, além de outras categorias de GEEs (Gases de Efeito Estufa) como o metano ( $CH_4$ ) e o óxido nitroso ( $N_2O$ ), frequentemente liberados pela ação de insumos agrícolas.

Diferentemente dos carvões ativados, o biocarvão pode ser utilizado sem modificações (AHMAD *et al.*, 2014) além da aplicação como adsorvente para a remoção de poluentes orgânicos (corantes, pesticidas etc.) e inorgânicos, como metais potencialmente tóxicos (MOHAN *et al.*, 2014).

Estudos recentes têm apontado a capacidade do biocarvão de reter metais potencialmente tóxicos dispersos no solo e que poderiam, por lixiviação, alcançar o sistema hídrico superficial ou subterrâneo. Desse modo, tais metais permaneceriam inertes nas estruturas químicas do biocarvão, diminuindo ou eliminando seu fluxo pela cadeia trófica. Segundo estudo de Barbosa (2013) sobre as aplicações do biocarvão de bagaço de cana, com carbonização a 500°C e pressão de 250 mm  $H_2O$ , voltado a descontaminação por metais potencialmente tóxicos em soluções aquosas, obteve-se resultados expressivos na configuração de uma barreira reativa permeável, adsorvente de boa parte dos metais, principalmente o Pb e Cu em todos os pH's. Uma outra alternativa de aplicação do biocarvão na área de saneamento é sua capacidade de auxiliar a ação de técnicas fitorremediadoras, onde plantas

específicas são introduzidas no ambiente contaminado e conseguem pelas raízes absorver os metais potencialmente tóxicos e mantê-los inertes na circulação trófica.

### **3.2.3. Interações físico-químicas do biocarvão**

Quase todos os sólidos apresentam a propriedade de reter moléculas em sua superfície e esta propriedade pode ser bastante acentuada no caso de materiais porosos ou finamente divididos. As forças envolvidas podem variar desde as de natureza puramente física (adsorção física) até as de natureza química (adsorção química), (KALINKE, 2015).

Segundo Boscov (2008), a adsorção é o processo físico-químico no qual uma substância é acumulada em uma interface entre fases, sendo esse um dos processos mais aplicados na recuperação de águas contaminadas.

Os parâmetros principais que influenciam na capacidade de adsorção que um material apresenta em determinado meio são a sua área da superfície específica ( $\text{m}^2/\text{g}$ ), a porosidade, a distribuição de tamanho de poro e a temperatura do ambiente de interação ou reação físico-química.

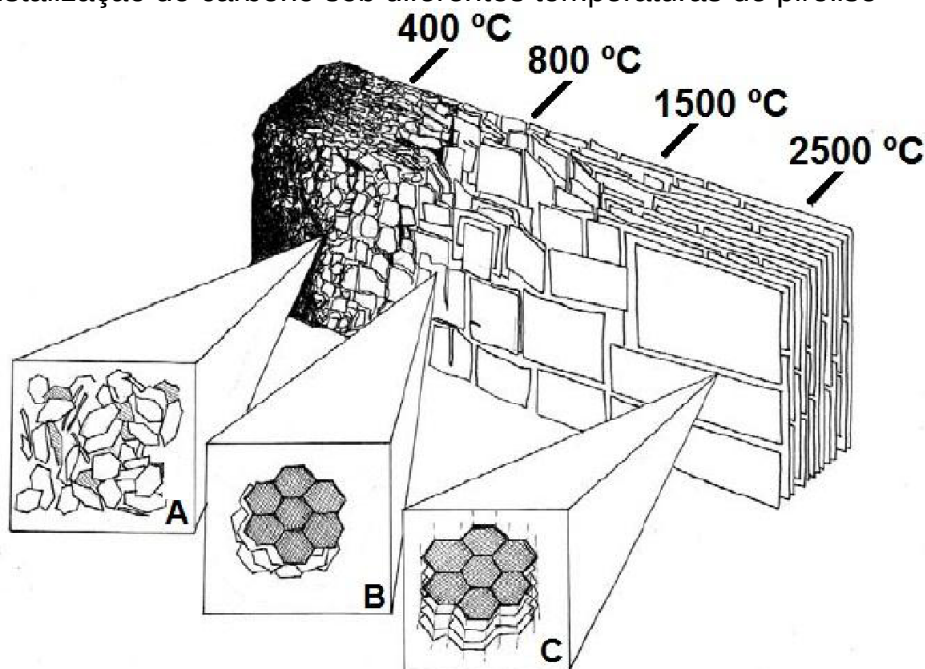
A adsorção física ou fisissorção é um fenômeno de ligação de longo alcance, mas fraco; podendo ser adsorvida como vibrações da rede do adsorvente e dissipada como movimento térmico. Assim, trata-se de um processo facilmente reversível, que pouco contribui no encapsulamento definitivo dos adsorventes.

Já a adsorção química ou quimissorção se dá por ligações químicas covalentes, de moléculas (ou átomos) unindo-se à superfície do adsorvente por efeito catalítico. Ocorre uma distância menor entre superfície e o átomo mais próximo do adsorbato, assim, há a formação de uma única camada sobre a superfície sólida com irreversibilidade e liberação considerável de energia (da ordem de uma reação química), (KALINKE, 2015).

A maioria dos materiais ligno-celulósicos submetidos ao processo de pirólise formam cristais de carbono que adquirem excelente capacidade de adsorção química de metais potencialmente tóxicos por sua facilidade em promover trocas iônicas, principalmente com íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , enquanto em grupos carboxila e hidroxila podem acontecer complexações ou atração do cátion, a depender da carga da superfície (LAGE JUNIOR, 2016). A porosidade deste material cria também uma ampla superfície específica, estimulando o volume de reações.

A formação de cristais de carbono em materiais ligno-celulósicos tende, em geral, a ser maior quanto mais alta a temperatura do processo de pirólise, conforme se observa na Figura 4. Segundo Kalinke (2015) a partir de 1.000 °C a estrutura é composta predominantemente por C e H. A pirólise de toda a biomassa poderá produzir grafite, dependendo das condições adotadas no processo, o que ocorre normalmente acima de 2.500 °C. Tal aquecimento contribui para o aumento da porosidade do biocarvão, ampliando sua área superficial específica e a formação de diversos grupos funcionais superficiais.

Figura 4– Cristalização do carbono sob diferentes temperaturas de pirólise



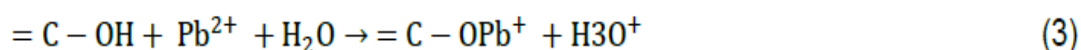
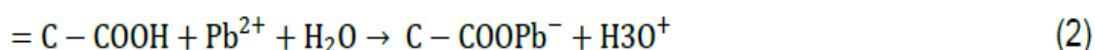
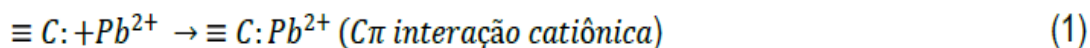
Fonte: KALINKE ( 2015) Adaptado de Lehmann e colaboradores

A interação entre o biocarvão e os compostos inorgânicos pode ocorrer ainda de outras maneiras além da adsorção como troca iônica, atração eletrostática e precipitação.

Na troca iônica há liberação de íons metálicos ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ), normalmente ligados aos grupos funcionais ou óxidos minerais do biocarvão, podendo haver posteriormente interação de íons metálicos contaminantes. Na atração eletrostática, os ânions metálicos sofrem complexação com os grupos funcionais positivamente carregados do biocarvão, geralmente carboxilas protonadas, ou a complexação de cátions metálicos com os grupos funcionais

negativamente carregados, geralmente hidroxilas e carboxilas desprotonadas (LAGE JUNIOR, 2019).

Quimicamente, Kalinke (2015) demonstra através do esquema construído por Cao *et al.* (2011) o mecanismo que favorece a adsorção do chumbo (Pb) pelo biocarvão, relacionado com sua ligação com o C, após liberação do H, descrito esquematicamente pelas equações 1, 2, 3:



Mecanismo semelhante para retenção do cromo (Cr), cobre (Cu) e outros metais são mencionados também por outros autores como Puga (2015), Lage Júnior (2016).

Como o biocarvão apresenta superfície altamente funcionalizada, isso pode explicar a sua elevada interação com compostos orgânicos e inorgânicos. Na superfície do biocarvão, grupos funcionais contendo oxigênio são os principais e mais comuns sítios presentes, uma vez que os átomos de oxigênio podem se combinar com átomos de carbono formando um amplo espectro de grupos funcionais. Nessa superfície podem também surgir grupos funcionais de menores concentrações, como aminos, fosfatos e sulfurosos (KALINKE, 2015); (PUGA, 2015).

#### **3.2.4. Possibilidades de aplicação do biocarvão em tratamento de solos contaminados por metais potencialmente tóxicos.**

Conforme Amaral Sobrinho *et al.* (2009) os metais potencialmente tóxicos no solo encontram-se nas seguintes formas químicas:

- Solúvel: espécies mais móveis e potencialmente disponíveis;
- Trocável: retidas por forças eletrostáticas aos coloides do solo;
- Adsorvidos especificamente: retidos fortemente em sítios específicos na superfície de óxidos de Fe, Al e Mn, na caulinita e por coloides orgânicos por ligações covalentes;
- Oclusas em óxidos de Fe, Al e Mn: inicialmente o metal adsorvido é retido na forma trocável, podendo passar para formas covalentes com o tempo;

- Retidas em material orgânico insolúvel: os cátions são quelados no material orgânico;
- Precipitado: compostos pouco solúveis (carbonatos, sulfetos, fosfatos e hidróxidos). Uma vez presente no solo e na água, em contato com outros elementos químicos, todos os metais estão sujeitos a reações contínuas de precipitação, dissolução, adsorção, dessorção, complexação e oxirredução.

A adsorção é definida como o acúmulo de uma substância ou material na interface entre uma espécie sólida e uma solução e é o processo físico-químico mais importante no controle da biodisponibilidade e do comportamento de metais em solos (SPARKS, 2003).

A adsorção de metais potencialmente tóxicos pelo solo depende de vários fatores, tais como os teores de argila, de matéria orgânica, de óxidos de Fe, de Al e de Mn, o pH, a superfície específica e a constituição mineralógica do solo (ALLEONI *et al.*, 2005).

Há dois tipos principais de adsorção: a específica (esfera interna) e a não específica (esfera externa), sendo que na adsorção específica ocorrem ligações iônicas e covalentes (mais fortes) e na não específica ocorrem ligações eletrostáticas e os íons estão sempre hidratados. Os graus de mobilidade, atividade e biodisponibilidade dos metais potencialmente tóxicos também dependem de fatores, como: pH, temperatura, potencial redox, CTC (capacidade de troca catiônica), competição com outros metais, ligação com ânions e composição, além da força iônica da solução do solo (ERNANI, 2008).

O entendimento das interações dos metais com outros elementos do ecossistema circundante depende de encontrar-se numa condição lábil ou numa condição inerte. Goveia (2010), afirma que a relação entre a dissociação química e o transporte na direção de uma interface, expressam a labilidade de um complexo, sempre dependente do tempo efetivo de difusão. Os complexos metálicos são assim distinguidos em totalmente lábeis, quando o fluxo controlado pela cinética (JC) é significativamente superior ao fluxo controlado pela difusão ( $JC \gg JD$ ), ou em materiais semilábeis, quando os fluxos aproximadamente se equivalem ( $JC \approx JD$ ). Dessa comparação, resulta o índice de labilidade (L) que é dado pela razão do fluxo controlado pela cinética pelo fluxo controlado pela difusão ( $L = JC/JD$ ), com J representando a quantidade de substância transportada por unidade de área e pelo tempo ( $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ).

Nesse índice,  $L \gg 1$ , define complexos metálicos totalmente lábeis, onde a cinética de associação/dissociação é tão rápida que mantêm o equilíbrio com o íon metálico livre na camada de difusão. Assim, a labilidade dos metais ao biocarvão depende das condições do meio circundante onde se insere essa interação.

Diferentes pesquisas como Thies, Rillig (2009), Araujo *et al.* (2002), Ernani (2008) apontam que na natureza, as condições pedológicas de zonas tropicais mais relevantes na adsorção da maioria dos metais são o teor de carbono orgânico do solo, a troca catiônica por pH, a textura do solo definida pela proporção entre partículas arenosas, silticas e argilosas e as variáveis químicas das argilas.

Em estudos apresentados por Araujo *et al.* (2002), foram simulados processos de percolação da água, com diferentes amostras de solo, relacionadas a 12 classes principais de solos brasileiros. Os parâmetros de comparação dos solos, seguindo modelo proposto pela EMBRAPA (1997) foram os teores de argila, de carbono orgânico, de ferro extraído pelo citrato-ditionito bicarbonato, de alumínio total determinado pelo ácido sulfúrico ( $Al_2O_3$ ), a capacidade de troca catiônica efetiva do solo e as composições mineralógicas das argilas. A essas amostras de solo foram adicionados metais contaminantes (cobre, chumbo, zinco e cádmio), buscando-se mensurar quais atributos físico, químicos e mineralógicos de cada classe de solo impactam mais diretamente na capacidade de adsorção desses metais.

Nesse estudo, constatou-se que de modo aproximadamente semelhante para os quatro metais a argila de origem óxido metálica é o principal responsável pela adsorção, com pouco ou nenhum efeito da troca catiônica específica, assim como do teor de carbono orgânico. A composição mineralógica das argilas mostrou-se uma variável relevante, dada a interação com o ferro e o alumínio. O aumento do pH também foi significativo para a desprotonação dos sítios de Lewis e formação de complexos estáveis, principalmente do chumbo. Esses metais apresentam afinidade ao grupo funcional OH, encontrado na caulinita e no óxido, oxidróxido e hidróxido de Fe e Al.

Há de se considerar ainda que, em uma situação real, essas interações químicas sofrem ainda a influência das variáveis microbiológicas do ambiente. Thies, Rillig (2009) explicam que a adsorção do substrato por microorganismos para superfícies de biocarvão pode resultar em uma maior concentração de substrato perto das células bacterianas anexas. No entanto, aminoácidos e peptídeos que entram na região intercamada das argilas em expansão, como a montmorilonita,

podem inibir esse metabolismo, porque as células deixariam de interagir com o substrato.

Segundo Manfredini *et al.*(2005) os solos arenosos apresentam material particulado entre 0,05 a 2mm, constituído basicamente por sílica (fragmentos de quartzo) que são quimicamente inertes. A alta porosidade desses solos combinado com suas particularidades químicas permite um expressivo fluxo dos elementos metálicos dispersos na água, tanto em sentido horizontal como vertical, evidenciando forte tendência de os agentes contaminantes atingirem com velocidade os lençóis subterrâneos. Nessas situações, o biocarvão pode funcionar como barreira significativa para uma ampla variedade de metais contaminantes, por adsorvê-los tanto por ação física (via porosidade entre os cristais de carbono) como pela quimisorção.

Nos organossolos, comuns nos fundos de vale e baixadas das regiões tropicais florestadas, a textura do solo já é mais compacta além de estar quase totalmente preenchida pela água. Segundo os testes mencionados de Araújo *et al.*(2002) a fraca interação química dos metais estudados com as partículas húmicas e o carbono orgânico levam a supor que esses elementos apresentarão também expressiva movimentação diluído no corpo hídrico. Assim, o biocarvão apresentaria aqui maior expressividade de quimisorção e encapsulamento por trocas iônicas com  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ .

Já nos latossolos, predominantes no território brasileiro, a forte presença de argilas com óxidos de Fe e Al tendem a representar um desafio maior para a aplicação do biocarvão como agente remediador do chumbo, uma vez que a menor porosidade e a afinidade do chumbo ao grupo funcional OH, presente na caulinita e no óxido, oxidróxido e hidróxido de Fe e Al, parece competir diretamente com as propriedades adsorventes do biocarvão, tanto a nível físico de sua porosidade, como químico. Com temperaturas mais altas, a reatividade química dessas argilas tenderá a ser ainda maior, mostrando a necessidade de se contrapor os testes físico-químicos a diferentes possibilidades de incidência solar direta.

### **3.2.5. Biocarvão no auxílio de processos de fitorremediação**

A utilização de vegetais em sistemas de tratamento de solos, conhecido como processo de fitorremediação, visando imobilizar, remover ou tornar inofensivos os

contaminantes orgânicos ou inorgânicos, tem atraído a atenção de pesquisas na área da Engenharia de Bioprocessos, uma vez que em comparação com as técnicas tradicionais (bombeamento ou remoção física da camada contaminada) tem se mostrado uma alternativa eficaz, principalmente pelo seu baixo custo (CUNNINGHAM *et al.*, 1996)

Segundo Accioly; Siqueira(2000), as plantas fitorremediadoras são classificadas de acordo com seu mecanismo de tolerância em:

- Exclutoras; quando mantém constante a concentração de metal absorvido até atingir o nível crítico no substrato;
- Indicadoras; com absorção passiva e concentrações internas refletindo os teores externos;
- Acumuladoras; capazes de manter níveis internos mais elevados que do substrato de cultivo.

As plantas acumuladoras são próprias para fitoextração enquanto as exclutoras para fitoestabilização. Espécies vegetais tolerantes, que conseguem acumular acima de 1% da sua massa seca de metais potencialmente tóxicos, como Zn, Pb, Cu atuam pela formação de fitoquelatinas, sequestram os íons metálicos, preservando-os de maneira não deletéria em suas células (MOHR; SCHOPFER, 1995).

As plantas fitorremediadoras conhecidas são, em sua maioria, provenientes das zonas de clima temperado devido ao maior volume de pesquisa dos países desenvolvidos em tecnologia de bioprocessos. (ACCIOLY; SIQUEIRA, 2000). No Quadro 2 estão alguns exemplos de plantas e com quais metais elas interagem, segundo Accioly e Siqueira, 2000.

Quadro 2 - Plantas fitorremediadoras para descontaminação por metais potencialmente tóxicos

| <b>Planta</b>                     | <b>Contaminante indicado</b> |
|-----------------------------------|------------------------------|
| <i>Agrostis capillaris</i>        | Zn                           |
| <i>Agrotis stolonifera</i>        | Cu                           |
| <i>Ambrósia artemisiifolia</i>    | Pb                           |
| <i>Azolla pinnata</i>             | Pb, Cu, Cd, Fe, Hg           |
| <i>Bacopa monnieri</i> L. Pennell | Cu, Cr, Fe, Mn, Cd, Pb       |
| <i>Brassica juncea</i>            | U, Zn, Cd                    |
| <i>Brassica napus</i>             | Zn, Cd                       |
| <i>Brassica rapa</i>              | Zn, Cd                       |
| <i>Ceratophyllum demersum</i> L.  | Cu, Cr, Fe, Mn, Cd, Pb       |
| <i>Eichhornia crassipes</i>       | Pb, Cu, Cd, Fe, Hg           |
| <i>Festuca rubra</i>              | Zn                           |
| <i>Helianthus annuus</i> L.       | Metais pesados e U           |
| <i>Hydrocotyle umbellata</i>      | Pb, Cu, Cd, Fe, Hg           |
| <i>Hygrrhiza aristata</i>         | Cu, Cr, Fe, Mn, Cd, Pb       |
| <i>Lemna minor</i>                | Pb, Cu, Cd, Fe, Hg           |
| <i>Lemna polyrrhiza</i>           | Zn                           |
| <i>Silene cucubalus</i>           | Zn                           |
| <i>Silene itálica</i> Pers.       | Ni, Cd                       |
| <i>Spirodela polyrrhiza</i> L.    | Cu, Cr, Fe, Mn, Cd, Pb       |
| <i>Thlaspi</i> sp.                | Metais pesados               |

Fonte: adaptado de ACCIOLY e SIQUEIRA, 2000.

O biocarvão pode trabalhar como agente colaborativo dos processos fitorremediadores, uma vez que ao reterem os metais em camadas mais próximas à superfície, permite que estes sejam acessados pelas raízes, ao invés de se diluírem com os fluxos hídricos de lixiviação para camadas mais inferiores.

Trabalhos de Conzalez *et al.* (2003); Andrade *et al.* (2009) sugerem a possibilidade de uso da grama-batatais (*Paspalum notatum* Flüggé) como possibilidade para emprego de estratégia fitoextratora de cromo e chumbo entre outros metais do solo. Essa vegetação teria a vantagem de baixo custo, alta

rusticidade, facilidade de aplicação às condições climáticas tropicais do Brasil e a formação de uma rede ampla de cobertura reticular das raízes criando uma barreira protetora sobre o solo ao processo erosivo. No caso das duas pesquisas citadas foram feitos cultivos de grama sobre solos contaminados em casa de vegetação e em ambiente aberto. Após um período médio de 80 dias, foram extraídas amostras das plantas, lavadas em solução de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) e em seguida liofizadas para análise laboratorial da matéria seca. Ambos estudos concluíram que a *Paspalum Notatum* apresentou pequena capacidade absorção de chumbo por suas raízes e capacidade insignificante para o cromo.

Torna-se potencialmente válida a investigação se a aplicação de biocarvão, como aditivo ao solo, poderá potencializar a ação fitoextrativa da *Paspalum Notatum* e torná-la uma alternativa viável em projetos de saneamento de solos das zonas tropicais, que carecem ainda de estudos mais profundos quanto alternativas tecnológicas de fitorremediação.

### **3.3. Elementos pedológicos e seus processos de interação**

A Pedologia pode ser entendida como a ciência dos solos (pedo – solo, lugar onde se pisa); (logo- conhecimento, razão). Segundo o professor G. Aubert apud De Queiroz Neto(1984), solo é definido como “a massa de elementos agregados, geralmente friáveis, que se encontra na superfície da parte emersa da crosta terrestre, resultante das ações da atmosfera e biosfera sobre a litosfera, durante um tempo determinado”.

Segundo Espinola (2010) a partir do século XX, em especial como decorrência da evolução da ciência agrônoma, os estudos sobre solo aprofundaram-se seguindo diferentes ramos, analisando sua gênese, fertilidade, mecânica etc, cabendo à Pedologia o papel de classificação e mapeamento.

A compreensão detalhada das constituições e comportamento do solo é fundamental em estudos de saneamento, pois segundo Boscov (2008), a principal causa para deterioração das águas superficiais e subterrâneas decorre de ações antrópicas degradadoras do solo. Embora esses processos ocorram de modo lento, sem consequências trágicas de imediato, a longo prazo, trarão efeitos sérios.

A proposta de imobilizar os fluxos de metais potencialmente tóxicos à partir do biocarvão enquadra-se assim como estratégia funcional para evitar que estes fluam

das partes superficiais do solo para as camadas subterrâneas de aquíferos, assim como espalhem-se pelo meio trófico que flui pelo substrato.

Os solos do planeta, segundo De Queiroz Neto (1984), são constituídos em média de 45% de material mineral, 25% água, 25% ar e aprox. 5% de matéria orgânica (excluindo-se a micro e macro fauna e flora que se mantém ativa).

O estudo prático dos solos envolve técnicas de campo específicas para sistematizar a coleta e mapeamento das amostras e técnicas laboratoriais, com uso de peneiras micro e macroscópicas, estufas para controle de umidade do solo e reagentes químicos para análise de pH, matéria orgânica etc. Segundo Manfredini *et al.* (2005) a análise de campo se dá por três formas de visualização, a bidimensional com expressão vertical, onde se analisa a sucessão de camadas da superfície para o subsolo, a expressão lateral, analisando a distribuição de horizontes ao longo das vertentes e a tridimensional que avalia a distribuição dos sistemas de solos numa bacia hidrográfica ou numa dada unidade da paisagem geomorfológica.

Quanto aos elementos de análise dos solos destacam-se a cor, a textura, a estrutura, a porosidade e a atividade biológica. A combinação desses elementos com o estudo da sua gênese em função da geomorfologia local serve, por fim, como ferramentas classificatórias dos tipos de solos. No Brasil, segundo site da EMBRAPA, os principais tipos de solos encontrados são Argissolos, Cambissolos, Espodossolos, Gleissolos, Latossolos, Luvisolos, Neossolos, Nitossolos, Planossolos, Plintossolos, Vertissolos e Organossolos (EMBRAPA –SOLOS).

Cada um desses tipos de solo possui comportamentos distintos quanto a hidrodinâmica de infiltração e percolação. O termo infiltração se refere à água absorvida pelo solo, sendo que as características texturais são as que mais interferem na velocidade e comportamento dessa infiltração. A característica específica do processo de infiltração para cada perfil de solo é chamada de percolação. A percolação da água no solo sofre duas forças de ação, a gravitacional e a capilaridade. A força gravitacional direciona a água verticalmente pelo perfil do solo, enquanto a força capilar impulsiona a água em todas as direções, em especial para cima, tendendo a ser mais forte quanto menor for a porosidade do solo (NETTO, 1995). Assim, atribui-se o termo “água capilar” a porção de umidade do solo retida entre as suas partículas, que só pode ser extraída dele por evaporação ou pela absorção das raízes. A água que desce até atingir as camadas freáticas subterrâneas é denominada como “água gravitacional”.

A textura do solo é, possivelmente, a propriedade mais relevante para determinar a infiltração e percolação da água no solo, tomando-se por textura como sendo a composição granulométrica dos constituintes minerais do solo individualizados, com tamanhos bastante variados, distintos em classes em função do tamanho das partículas, sua natureza mineralógica e sua função no solo. (MANFREDINI *et al.*, 2005).

A distinção textural dos solos adotada no Brasil pela EMBRAPA é:

- Argila: frações de minerais inferiores a 0,002 mm de diâmetro, composta principalmente por hidróxidos de alumínio, óxidos e hidróxidos de ferro. Juntamente com o húmus, compõe a parcela do solo com maior capacidade de retenção da água capilar e é a parte ativa em termos de fornecimento de nutrientes às plantas.
- Silte: frações intermediárias de 0,002mm a 0,05mm de diâmetro, constituído principalmente por minerais primários e secundários.
- Areia: frações entre 0,05mm a 2 mm de diâmetro, constituído basicamente por quartzo, praticamente não exerce função química. A alta porosidade entre as partículas arenosas e outras partículas permite o fluxo da água e ar pelo solo.

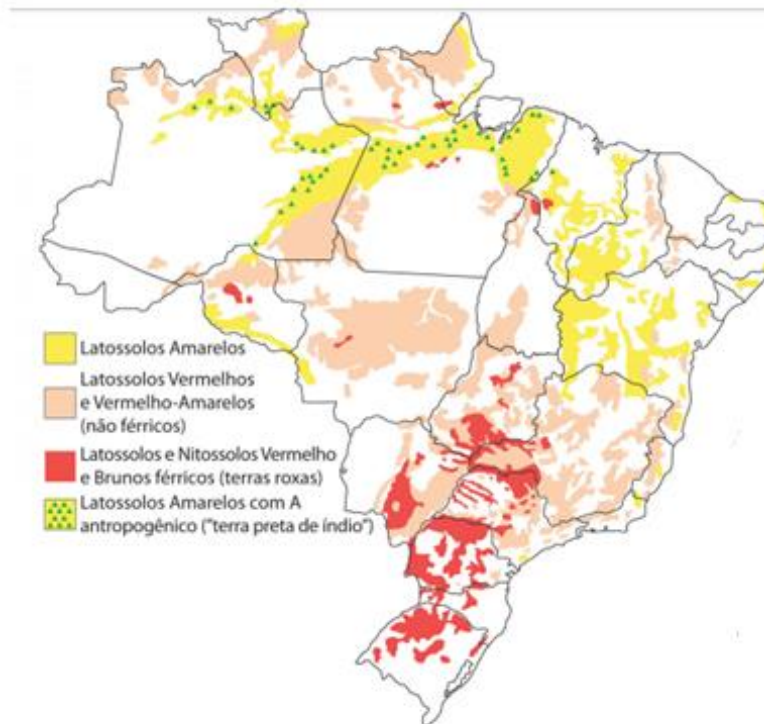
Tendo por base a proporção entre esses tipos de partículas, os solos são classificados em:

- Textura muito argilosa: forma pastosa, ou então muito endurecida em períodos secos, praticamente sem partículas arenosas. Em geral é inviável para o crescimento da maioria das plantas, pois sufoca as raízes ao impedir o fluxo de ar.
- Textura argilosa: apresenta alguns compostos sílticos ou arenosos, mas ainda insuficiente para o desenvolvimento adequado da vegetação.
- Textura média: equilíbrio na proporção entre areia, silte e argila, são em geral os mais positivos para o desenvolvimento da maioria das plantas e a prática agrícola, pois retém nutrientes e umidade, permitindo um bom fluxo de água e ar entre os poros das partículas.
- Textura arenosa: material grosseiro, não consolidado. São solos pobres em nutrientes, com baixa capacidade de retenção de água capilar e por isso inviável para a maioria das práticas agrícolas.

### 3.3.1. Latossolos

Os latossolos são bastante comuns no Brasil, ocupando cerca de 39% do território (SiBCS; EMBRAPA, 2011). A distribuição das variáveis de latossolos no território brasileiro são vistas na Figura 5, com predomínio nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, justamente em zonas de alta ocupação agrícola.

Figura 5 - Distribuição de latossolos no Brasil



Fonte: LEPSCH, 2010

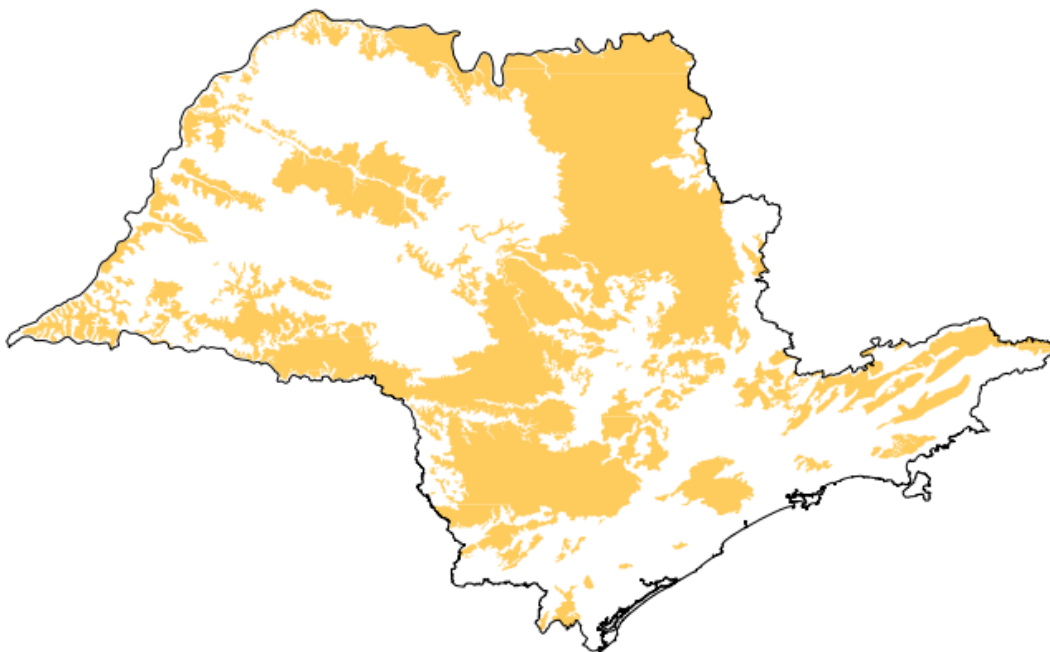
Correspondem a solos bastante intemperizados por diversos processos paleoclimáticos de milhões de anos, submetidos a erosão e variados ciclos poligênicos em áreas de relevo relativamente planos e estáveis. Por conta disso, a maior parte dos minerais de seus regolitos foram lixiviados, sobrando apenas os mais resistentes, como o quartzo, aos quais foram acrescidos óxidos de ferro (nos solos de coloração mais avermelhada) ou óxidos de alumínio (nos solos mais amarelados). Devido à restrita presença de cátions básicos, são normalmente ácidos, exigindo trabalho de adubação e calagem para que se tornem agricolamente produtivos. Do ponto de vista orgânico têm expressiva bioturbação pela atividade de

fauna (principalmente formigas e cupins) e pobreza de nutrientes orgânicos, restritos ao material “em trânsito” das espécies vegetais superficiais (LEPSCH, 2010).

Estruturalmente, são bastante profundos e apresentam acentuada permeabilidade, mesmo quando apresentam textura mais argilosa, devido à tendência de seus grãos agruparem-se em granulados, denominados “pseudo-areias”.

Do ponto de vista de intervenção antrópica os Latossolos Vermelhos estão entre os mais relevantes do Brasil, por ocorrer em áreas onde a agro-indústria passou a avançar com muita velocidade a partir da década de 70, muitas vezes sem adotar ações adequadas de manejo agrícola conservacionista. No Sul e Sudeste Brasileiro esses solos são encontrados também em áreas de expressiva ocupação urbana e muitas vezes deslocados entre áreas de loteamento por servirem satisfatoriamente a trabalhos de engenharia civil como solos de empréstimo para terraplanagem. Na Figura 6 constata-se a predominância do Latossolo no território paulista, em especial na zona da depressão central do Estado.

Figura 6 - Ocorrência de Latossolos no Estado de São Paulo



Fonte: IAC, 2015

Os latossolos apresentam diferentes categorias que distinguem bastante seu potencial agrícola.

Os Latossolos Vermelhos de textura argilosa ou muito argilosa apresentam caráter férrico associados às calhas de drenagem de alguns rios, como o Paranapanema e o Tietê, desenvolvidos de rochas básicas, com moderada reserva de macro e micronutrientes (LEPSCH, 2010). Estáveis mecanicamente, têm alta resiliência e capacidade produtiva estável ao longo de anos de cultivo, quando são seguidas as técnicas adequadas de manejo.

Os Latossolos Vermelho-Amarelos de Textura argilosa, encontrados principalmente na Depressão Periférica da Borda Leste da Bacia do Paraná, formados a partir de rochas sedimentares de granulometria fina (como folhelhos siltitos) ou no Planalto Atlântico, desenvolvidos de rochas sedimentares e de rochas de origem ígnea e metamórfica e tendem a menor disponibilização de minerais nutrientes à agricultura (IAC, 2015).

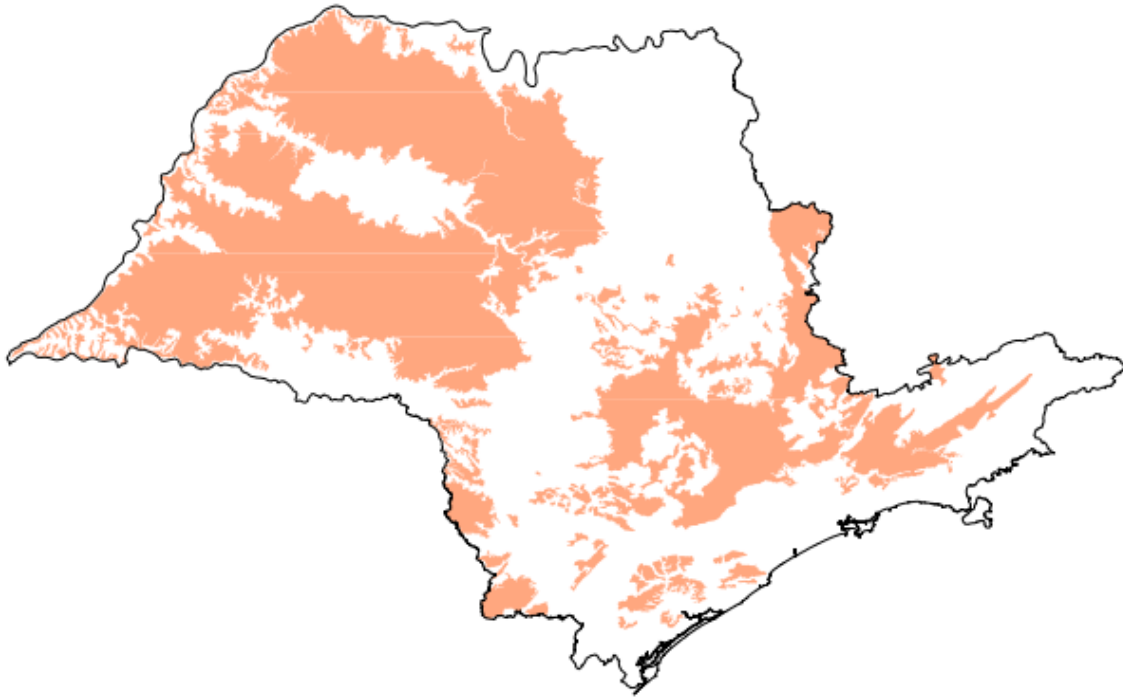
Os Latossolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos de textura média são característicos das regiões do Planalto Ocidental, da Depressão Periférica e das Cuestas Basálticas. Desenvolvidos de arenitos, localizando-se em posições com relevo suavizado (declividades de 0 a 20 %). Possuem elevada permeabilidade, baixa retenção de água e baixa coesão, sendo assim muito sensíveis à degradação sob manejo agrícola. Pela baixa capacidade de retenção hídrica são mais suscetíveis ao estresse hídrico nos períodos de estiagem e ao mesmo tempo, pela baixa coesão, suscetíveis a erosão nos períodos chuvosos. Quimicamente, são ácidos com pouca retenção de cátions e necessitando de fertilização corretiva frequente (IAC, 2015).

### **3.3.2. Argissolos**

São solos minerais, com nítida diferenciação entre as camadas ou horizontes, com aumento, por vezes abrupto, nos teores de argila em profundidade. Podem em algumas situações, serem arenosos na superfície, de textura média. Possuem fertilidade variável em função do seu material de origem. A retenção de água é maior nos horizontes subsuperficiais, constituindo reservatório de água para as plantas (SiBCS; EMBRAPA, 2011).

Os Argissolos assim como os Latossolos estão entre as classes predominantes no Estado de São Paulo, como se verifica na Figura 7:

Figura 7 - Ocorrência de Argissolos no Estado de São Paulo



Fonte: IAC, 2015

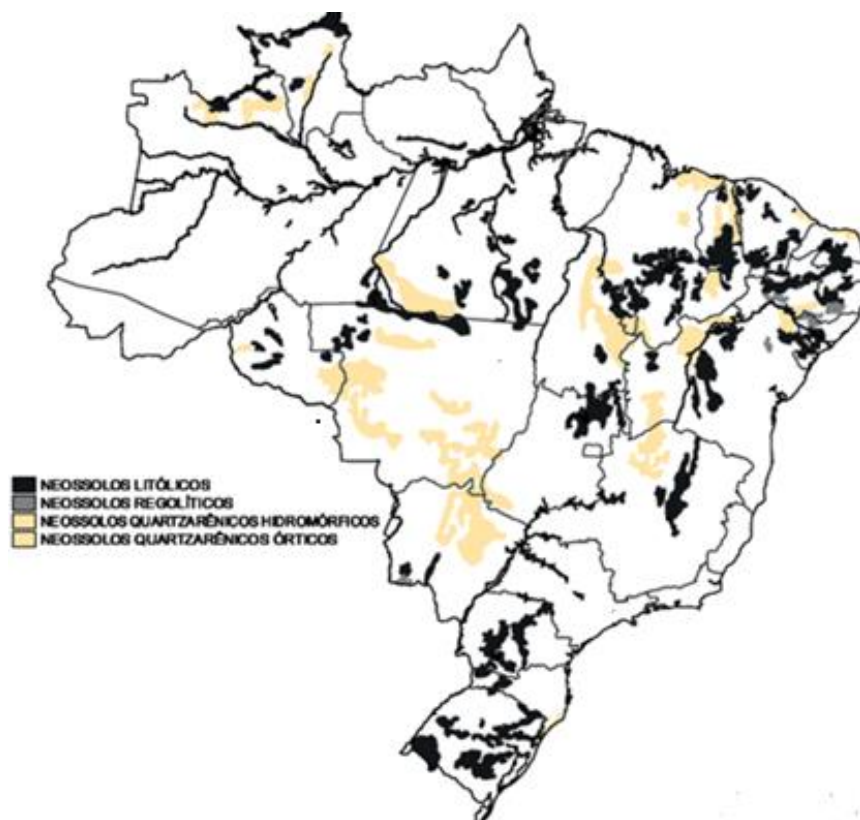
Os Argissolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos de textura arenosa/média são encontrados em todo o estado de São Paulo, desenvolvidos de materiais de origens diversas, excetuando as rochas básicas e as rochas sedimentares finas. São muito suscetíveis à erosão, exigindo ações intensivas de controle durante o manejo agrícola. A fertilidade química em geral é baixa, podendo ser pouco mais elevada quando sua pedogênese está relacionada a arenitos com teor de carbonato de cálcio do oeste do estado.

Os Argissolos de textura média/argilosa e argilosa resultam da decomposição de rochas ígneas e metamórficas do Planalto Atlântico, ou de rochas sedimentares finas nas outras regiões do Estado. Devido a pouca profundidade e a presença de cascalhos e calhaus na superfície nas zonas de relevo, com alta declividade do Planalto Atlântico, apresentam alto risco de descompartimentação da superfície, provocando zonas de alto risco de deslizamento de encosta. Por possuírem maior reserva de minerais, os Argissolos de textura argilosa são mais adequados à exploração agrícola que aqueles de textura média (IAC, 2015).

### 3.3.3. Neossolos

Os Neossolos são encontrados em aproximadamente 14% do território brasileiro conforme a Figura 8. Apresentam textura de média a grossa pelo predomínio quase exclusivo de areias quartzíticas com pouca ou nenhuma argila (LEPSCH, 2010).

Figura 8- Distribuição de neossolos no território brasileiro



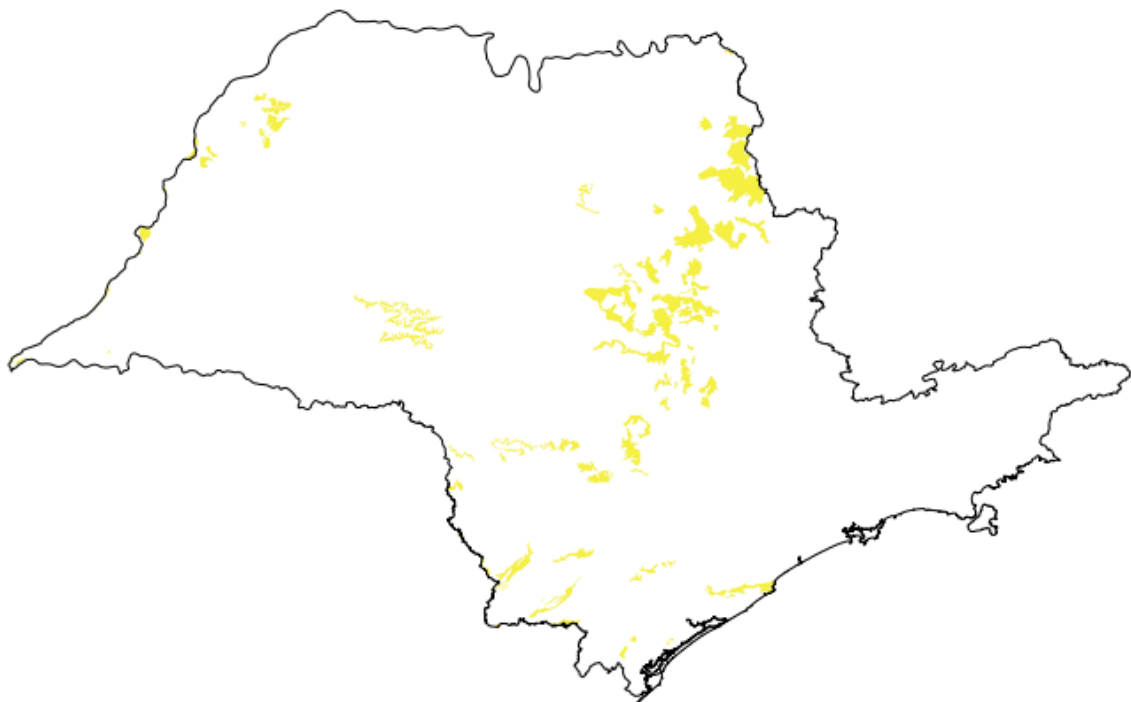
Fonte: SiBCS; EMBRAPA, 2011

Sofrem muita limitação para uso agrícola pela dificuldade na retenção de água e nutriente e até mesmo na ocupação urbana pela fraca coesão das partículas. Entretanto, tem relevância ecológica do ponto de vista hidrológico, pois estão geralmente na cobertura de embasamentos areníticos que são importantes reservatórios de aquíferos (SiBCS; EMBRAPA, 2011).

Os Neossolos apresentam quatro sub-ordens, relacionadas mais a sua idade e pedogênese do que diferenças significativas quanto a composição e estrutura:

Neossolos Litólicos, Flúvicos, Regolitos e Quartzarênicos (SiBCS; EMBRAPA, 2011). Exceto os Neossolos Flúvicos, os demais não oferecem espessura suficiente para o sistema radicular da maioria das plantas, por isso, geralmente estão associados a coberturas campestres ou no máximo arbustivas baixas (MANFREDINI *et al.*, 2005). A baixa presença de barreira protetiva vegetal torna esses solos bastante suscetíveis à contaminação profunda por escoamentos hídricos (por exemplo, chorume de aterros sanitários, derrames acidentais de cargas tóxicas ou descartes industriais). No Estado de São Paulo, conforme se observa na Figura 9, a ocorrência dos Neossolos na região central coincide com importantes áreas de recarga do Aquífero Guarani.

Figura 9 - Ocorrência de Neossolos no Estado de São Paulo



Fonte: IAC, 2015

Pelas condições de baixa profundidade (Neossolos Litólicos ou Neossolos Regolíticos), de baixa retenção de água (Neossolos Quartzarênicos) ou de elevada susceptibilidade à inundação (Neossolos Flúvicos), os Neossolos do Estado de São Paulo apresentam forte restrição agrícola, com indispensável manejo conservacionista para manter ativa a prática agrícola.

Os Neossolos Quartzarênicos originalmente associados a coberturas de cerrado e floresta estacional, provém da decomposição dos arenitos na Depressão Periférica e nas Cuestas e em algumas faixas no oeste do estado. São zonas de relevos suavizados, mas por terem coesão muito baixa, tendem a erodir com facilidade (IAC, 2015).

Os Neossolos Litólicos, típicos das regiões de relevo mais dissecado ou íngremes, geralmente associados às zonas escarpas nas regiões das grandes serras do estado, estão em zonas impróprias para práticas agrícolas, sendo prioritariamente destinados a criação de zonas de conservação de matas nativas ou, no máximo, culturas arbóreas permanentes, como a fruticultura. Condições semelhantes afetam os Neossolo Litólico Distrófico, geralmente encontrados nas escarpas das serras do Mar e da Mantiqueira, sob cobertura de Mata Atlântica, mas também podem ser encontrados também em zonas de campo ou de cerrado, onde podem muitas vezes serem convertidos para zonas de pastagem de pecuária extensiva, embora não sendo essa uma boa opção de ocupação, pois tornam ainda mais intensas as perdas por ação erosiva (LEPSCH, 2010).

#### **3.3.4. Gleissolos**

Tratam-se de solos minerais, geralmente formados em extensas baixadas e grandes vales, em condições de saturação com água das planícies ou várzeas inundáveis com coloração acinzentada e textura entre arenosa a argilosa espalhado por diferentes unidades geomorfológicas do Estado, conforme se vê na Figura 10. A fertilidade é bastante diversa, de baixa à elevada em função da influência dos solos do seu entorno à montante. São, em geral, zonas com inundações recorrentes que levam os solos a terem longos períodos de água saturada (SiBCS; EMBRAPA, 2011). Parcelas de vegetação original (floresta paludosa e de campo higrófilo) substituída por agricultura, encontram-se atualmente sob regeneração.

Nas baixadas litorâneas, o lençol freático sofre ação marinha originando Gleissolos Tiomórficos que, em virtude dos altos teores de enxofre e sais solúveis, acabam tendo uso agrícola bastante restritivo (IAC, 2015).

Figura 10- Ocorrência de Gleissolos no Estado de São Paulo



Fonte: IAC, 2015

### 3.3.5. Nitossolos

Os Nitossolos são solos minerais homogêneos, com pequena ou nenhuma diferenciação de cor com a profundidade. Tem textura argilosa o que favorece a retenção de água, mas garante ainda boa drenagem, propriedade física muito favorável diante da sazonalidade das chuvas e presença de prolongada estação seca. (SiBCS; EMBRAPA, 2011). São derivados, no Estado de São Paulo, das rochas básicas de origem vulcânica (basalto e diabásio), reconhecidos pela fertilidade, em geral, bastante elevada popularmente chamados de Terras Roxas, adquiriram fama, principalmente no início do século XX pelo avanço da cafeicultura no centro oeste paulista (Figura 11). A ocorrência em terrenos de ondulação moderada, de frentes de cuesta e morros testemunhos, exige cuidados quanto à conservação preventiva contra erosão (IAC, 2015).

Figura 11- Ocorrência de Nitossolo no Estado de São Paulo



Fonte: IAC, 2015

### 3.3.6. Organossolos

Os organossolos normalmente apresentam coloração entre o negro e o castanho escuro. Não chegam a ser tão expressivos do ponto de vista de extensão territorial, mas o são do ponto de vista de uso econômico, por sua associação a cultivos agrícolas específicos. Em geral ocorrem em ambientes com depósito de matéria orgânica e concentração de água que ocasiona elevado intemperismo químico. Isso torna bastante difícil distinguir apenas por método físico de separação as partículas húmicas das partículas de minerais argilosos, altamente decompostas no meio aquoso, exigindo métodos bioquímicos nos laboratórios de análise de solo para distinção (IAC, 2015).

Em geral, esses solos estão associados a fundos de vale onde se formam vegetações de banhados, turfas e zonas de várzea. Na maioria das vezes apresentam teores baixos de oxigênio dissolvido e altas concentrações de carbono (DE QUEIROZ NETO, 1984). Nos organossolos de várzea ocorrem, em geral, trabalhos de drenagem que permitem seu uso para cultivo de arroz e hortaliças, até

mesmo em localidades bastante próximas dos grandes centros urbanos. Tendo em vista a prática frequente de lançar esgotos urbanos em cursos d'água, sem preocupação com a situação ou uso de solo das áreas à jusante, esta é uma outra situação distinta e preocupante, uma vez que pode ocorrer contaminação grave diretamente sobre hortaliças de consumo in natura.

No Estado de São Paulo há áreas significativas de Organossolos junto a planície litorânea conforme indicação da Figura 12. Nessas zonas a presença de sulfetos limita significativamente seus usos. Manejos inadequados e formas incorretas de drenagem podem resultar em aumento da oxidação e perda de matéria orgânica fértil.

Figura 12– Ocorrência de Organossolos no Estado de São Paulo



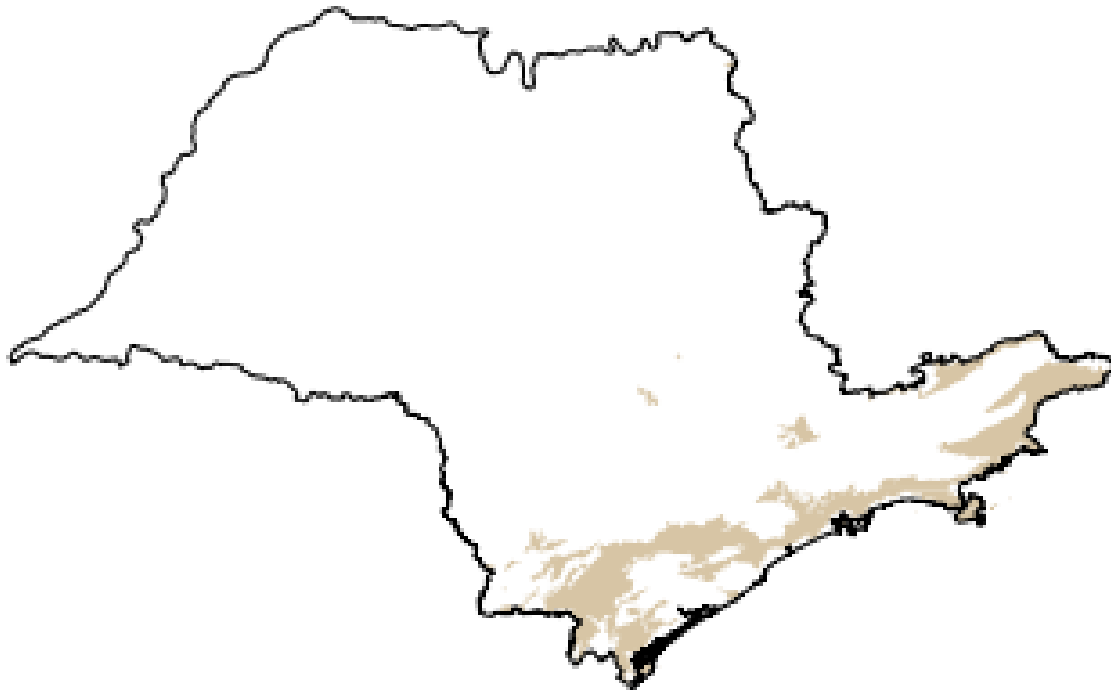
Fonte: IAC, 2015

### 3.3.7. Cambissolos

São solos minerais com características bastante variáveis, mas que têm em comum a textura média ou mais fina e pouco desenvolvimento pedogenético. Apresentam baixa profundidade e elevado teor de minerais primários (herdados da rocha de pedogênese). Com muita ocorrência de fragmentos de rocha, oferece boa reserva nutricional para as plantas, o que os valoriza para cultivos arbóreos perenes

ou florestais, como a silvicultura (SiBCS; EMBRAPA, 2011). Apresentam cor viva e teores expressivos de argila nos horizontes subsuperficiais. Após cuidados de preparação, como a retirada de pedregosidade e o terraceamento nas áreas mais íngremes, mostram-se aptos à utilização agrícola (IAC, 2015). É encontrado preferencialmente na porção leste do Estado, nas encostas dos Planaltos e Serras do Atlântico Leste e Sudeste, conforme pode se ver na Figura 13:

Figura 13 – Ocorrência de Cambissolos no Estado de São Paulo



Fonte: IAC, 2015

### 3.3.8. Espodossolos

Os Espodossolos são basicamente solos costeiros como se percebe na Figura 14, arenosos, com evidência de transporte de material coloidal, com alguns complexos organometálicos. Tem lençol freático variado de raso ou profundo, mas com teores residuais de sal marinho. Pela baixa fertilidade e textura grossa e pouco coesa, não são aptos para a atividade agrícola (IAC, 2015).

Figura 14– Ocorrência de Espodossolos no Estado de São Paulo



Fonte: IAC, 2015

### 3.4. Contaminação por metais potencialmente tóxicos

O contato e ingestão de minerais metálicos em doses consideradas impróprias à saúde humana tem se constituído um dos grandes problemas sócio-ambientais da atualidade (SOUZA; MORASSUTI; DEUS, 2018).

Na natureza, em geral, esses elementos químicos encontram-se concentrados em pontos específicos do subsolo, dos quais os seres vivos teriam pouco contato direto, ou dispersos em quantidade traço e inertes no solo ou nas águas, em níveis que raramente detonariam situações de risco (CUNHA, 2003)

Com a Revolução Industrial, a partir do século XVIII, houve um incremento expressivo de ações antrópicas que acentuaram o desequilíbrio quanto à distribuição de tais elementos na superfície do planeta, permitindo que eles adentrem de modo inadequado aos níveis tróficos de uma amplitude de seres vivos. Por serem em sua maioria bioacumulativos, esses elementos transferem-se de um organismo ao outro e, mesmo que absorvidos em pequena quantidade,

atingem níveis de toxicidade quando os períodos de exposição, contato ou absorção são temporalmente prolongados.

Todos os metais, bem como seus compostos, apresentam algum nível de toxicidade. Obviamente, tais efeitos dependem das taxas de acumulação. Assim, mesmo os metais necessários à saúde humana, como zinco e manganês, tornam-se tóxicos quando ultrapassam os limites adequados de absorção dentro de um prazo de tempo (SOUZA; MORASSUTI; DEUS, 2018).

### **3.4.1 Efeitos dos metais potencialmente tóxicos na saúde humana e no meio ambiente**

Segundo a INTERNATIONAL PROGRAMME ON CHEMICAL SAFETY (1992), os metais potencialmente tóxicos que apresentam maior representatividade de risco para a saúde humana e o meio ambiente são o chumbo, o cromo, o mercúrio e o cádmio.

O chumbo é o metal tóxico mais profuso no ambiente e sua exposição traz efeitos adversos em diferentes sistemas do organismo humano, de ordens neurológicas, hematológicas, metabólicas e cardiovasculares. Além disso, o chumbo tem elevada interferência no desenvolvimento da gestação dos fetos, sendo uma causa significativa de alta incidência de nascituros com problemas cerebrais e neurológicos em ambientes de alta contaminação (QUITERIO, 2006 apud FLECK *et al.*, 2013). Segundo relatórios da OMS, o chumbo ( $Pb^{2+}$ ) está associado ao crescimento da ocorrência de casos de osteoporose, anemia crônica, transtorno no sistema hematopoiético, disfunção do sistema nervoso central (retardo mental, distúrbio de aprendizado e encefalopatias em crianças).

A toxicidade do cromo (Cr) depende muito do seu estado de valência. Esse metal é encontrado naturalmente em diferentes formas de oxidação, como o cromo trivalente (Cr(III)), mais estável e que está presente inclusive em diversos alimentos, sendo essencial à saúde humana para aumentar a ação da insulina, favorecer a produção muscular e controle do colesterol (DA SILVA *et al.*, 2008). A absorção natural de cromo se dá por alimentos como carnes, ovos, leite e grãos integrais, sendo os níveis diários adequados de ingestão do cromo trivalente em torno 25 mcg para mulheres e 35 mcg para os homens. Em doses muito elevadas, que variam em função do organismo e do nível individual de atividade física, o excesso de cromo

trivalente pode trazer danos à saúde, como perda de apetite, maior risco de hematomas, dores de cabeça, tonturas, e náuseas, alterações urinárias e reações cutâneas. (GOMES; ROGERO; TIRAPEGUI, 2020)

Por outro lado, o cromo hexavalente (Cr(VI)) em ambientes aquáticos afeta os peixes mais suscetíveis a infecções em decorrência de alterações no sistema imunológico, e as concentrações elevadas, podem danificar e ou acumular-se em vários tecidos desses animais. Em mamíferos, doses acima de  $10 \text{ mg/kg}^{-1}$  de cromo hexavalente (Cr(VI)) quando ingeridos ou inalados afetam o trato gastrointestinal, os rins e o sistema hematológico. Compostos relativamente insolúveis, como o cromato de cálcio, o cromato de estrôncio e determinados compostos de cromato de zinco, produzem carcinomas broncogênicos, enquanto o cromato de lítio e o cromato de bário produzem respostas mais fracas (THE INTERNATIONAL PROGRAMME ON CHEMICAL SAFETY, 1989). Experimentos com o cromo hexavalente evidenciam a ocorrência de vários danos genéticos de curto prazo como alterações do DNA e incorporação dos nucleotídeos na transcrição do DNA. Em seres humanos, sua toxicidade está associada a dispnéia, tosse, tumores malignos de pulmão, danos renais, irritação da mucosa da pele (MUÑOZ, 2002).

Os empregos mais frequentes de compostos de cromo estão na indústria metalúrgica, compondo o ferrocromo para a produção de aço inoxidável e na produção de pigmentos para tintas, polímeros e curtumes. Também é utilizado na produção de refratários, (tijolos de cromo), revestimentos metálicos, conservante de madeiras e como catalisador para indústria química em geral (DA SILVA *et al.*, 2008)

Os diversos materiais com alto teor de cromo em sua produção, assim como diferentes resíduos da indústria química e de curtumes, quando descartados pelo meio ambiente, podem liberar gradualmente esse elemento, que tende a diluir-se pelo solo através da ação da água. Absorvido por plantas e animais, ele penetra na cadeia trófica e, devido ao seu caráter bioacumulativo, transita pela alimentação e dejetos ao longo de uma extensa sequência de organismos (THE INTERNATIONAL PROGRAMME ON CHEMICAL SAFETY, 1989).

O mercúrio (Hg) é um dos metais mais persistentes de transferência pela cadeia trófica no ambiente aquático, sendo suas principais fontes de contaminação os efluentes industriais e o garimpo de ouro. Também podem adentrar no meio ambiente em decorrência da extração mineral de outros metais, uma vez que, quando os solos são perturbados por atividades antrópicas, o mercúrio que se

encontra em sua forma natural em contato com o solo e a flora transforma-se rapidamente em formas móveis. Logo chega às cadeias alimentares por meio dos peixes e passam a outros níveis como, aves, mamíferos e seres humanos.

Estudos com cobaias de coelhos expostos ao vapor de mercúrio em concentração de  $29 \text{ mg/m}^3$  de ar mostraram evidências de danos no cérebro, rins, coração e pulmões. Os primeiros efeitos foram vistos após 1 hora de exposição, e as mudanças severas subsequentes resultaram após exposições mais longas (ASHE *et al.*, 1983).

Nos seres humanos, a concentração de mercúrio no organismo pode acarretar em disfunção no sistema nervoso central e periférico: perda de memória, tremores anormais, distúrbio do sono, excitação, possível quadro de demência, atrofia muscular, lesões renais, infertilidade, aborto, diversos tipos de câncer (MUÑOZ, 2002). Segundo a INTERNATIONAL PROGRAMME ON CHEMICAL SAFETY, de 1976, são possíveis tratamentos que tragam alguma melhoria na função ou na condição dos tecidos orgânicos contaminados por mercúrio, mas a recuperação nunca é completa.

Esgotos industriais, despejo irregular de algumas categorias de baterias elétricas e queima de combustíveis fósseis estão entre as principais causas de dispersão antrópica do cádmio no meio ambiente. A toxicidade do cádmio para peixes marinhos e de água doce, conforme o aumento na concentração de sais dissolvidos na água é diretamente proporcional à temperatura da água. Também, no caso de peixes de água doce, o aumento no teor de oxigênio dissolvido (OD) na água reduz a toxicidade do cádmio. Já os salmonídeos parecem ser mais suscetíveis ao metal, entre os quais se observa expressivas malformações na espinha dorsal (MUÑOZ, 2002).

Em mamíferos, a toxicidade deste elemento depende de fatores genéticos e da interação com outros metais (com zinco em particular). A inalação do cádmio em níveis elevados, segundo estudos laboratoriais com cobaias de camundongos evidenciou expressiva ocorrência de edema pulmonar letal (MUÑOZ, 2002). Quanto à ingestão pela via oral, detectou-se necrose do ovário e dos testículos de inúmeros animais, além da não-ovulação e vários danos no fígado. As doses maiores danificam a mucosa gástrica e intestinal e, a longo prazo, têm efeitos nos rins, fígado e nos sistemas imunológico, ósseo e cardiovascular. Já os efeitos teratogênicos e

os danos na placenta dependeram da relação entre a exposição e interações com o zinco (THE INTERNATIONAL PROGRAMME ON CHEMICAL SAFETY, 1992 ).

### **3.4.2. Contaminação do solo no Estado de São Paulo por metais potencialmente tóxicos**

Sendo a região mais populosa e industrializada do país, é de se esperar também que o Estado de São Paulo apresente índices elevados de contaminação por descarga de materiais tóxicos no ambiente.

Os metais potencialmente tóxicos estão dispersos pelo solo e rede hídrica e acabam sendo absorvidos pela população de modos diversos, seja na ingestão alimentar, consumo ou contato com água contaminada ou pela simples inalação. Pelo seu caráter bio-acumativo, em alguns indivíduos essa absorção lenta mas contínua desses elementos acabará por atingir níveis que desencadeiam doenças diversas.

Entre as principais fontes de liberação de metais potencialmente tóxicos no Estado de São Paulo, destacam-se: a mineração, o descarte inadequado de resíduos sólidos, os efluentes industriais e alguns insumos aplicados na atividade agrícola.

O conhecimento da Geografia Física e Humana do Estado de São Paulo é necessário nessa etapa para a compreensão de como os agentes contaminantes do solo se distribuem e assumem impactos distintos dentro de cada realidade.

O Estado de São Paulo apresenta quatro feições geomorfológicas distintas e bastante conhecidas sob o ponto de vista de análise ambiental (ROSS; MOROZ, 2011). As quatro macro-unidades geomorfológicas do Estado de São Paulo estão representadas na Figura 15, com acréscimo das Cuestas Arenito Basálticas como faixa de transição.

Figura 15 – Unidades Geomorfológicas do Estado de São Paulo



Fonte: OLIVEIRA; GUERRA, 2011

A planície litorânea, ou faixa costeira, abarca uma estreita faixa de terras com altitudes inferiores a 200m que vai da linha de costa até o início da escarpa que delimita a subida para o Planalto Atlântico. Essa faixa costeira é constituída na sua maior parte por sedimentos Cenozóicos Terciários e Quaternários pouco consolidados, com forte influência marítima em sua gênese e interação da água salgada marinha com o lençol subterrâneo, formando reservatórios de água salobra pouco aproveitáveis para atividade humana e que conferem ainda às coberturas urbanas costeiras instabilidade geotécnica, com problemas freqüentes nas fundações das edificações de maior porte (OLIVEIRA; GUERRA, 2011). A planície costeira é muita estreita na faixa norte, chegando mesmo a desaparecer em trechos de Ubatuba e Caraguatatuba, onde a escarpa da Serra do Mar encosta no oceano formando falésias de grande desnível altimétrico. Indo para o sul, a faixa costeira vai gradualmente se alargando, formando uma planície de sedimentação significativa à partir do litoral de Peruíbe, onde a bacia hidrográfica do rio Ribeira do Iguape passa a dar uma configuração mais distinta da paisagem, com solos de perfis mais diversificados e complexos, cobertos por grandes zonas de proteção ambiental, como o Parque da Juréia.

A segunda estrutura geomorfológica marcante é o Planalto Oriental, também conhecido por Planalto Atlântico e denominado na classificação de macro-estruturas

do relevo brasileiro de Jurandyr Ross como Planaltos e Serras do Atlântico Leste e Sudeste. Trata-se de uma grande estrutura de rochas cristalinas pré-cambrianas, principalmente granitos e gnaisses, bastante alteradas por falhas e fraturas tectônicas juntamente com o intemperismo tropical, formando uma superfície de relevo com grande dissecamento e altas declividades, entrecortado por vales de sedimentação recente, dos quais se destaca o vale do Paraíba, formado por coberturas sedimentares terciárias e quaternárias que corre de sudoeste, na grande São Paulo, para nordeste, em direção ao Rio de Janeiro, sobre a qual diversas cidades de grande e médio porte como Guaratinguetá, São José dos Campos e Taubaté se aglutinam na mancha urbana em conurbação, configurando a principal concentração urbano industrial do Brasil (ROSS; MOROZ, 2011).

No centro-leste do Estado, a terceira província geomorfológica é a Depressão Central, também chamada de Depressão Paulista, ou na classificação de Jurandyr Ross, a Depressão Periférica da Borda Leste da Bacia do Paraná. Constituída quase totalmente por sedimentos areníticos paleo-mesozóicos, apresenta solos de alta permeabilidade que originam a principal área de recarga do Aquífero-Guarani (OLIVEIRA; GUERRA, 2011).

Da metade do Estado para oeste, esses arenitos passam a ter extensas coberturas de rochas basálticas e diabásicas em decorrência de grandes eventos vulcânicos que afetaram a região no Mesozóico Superior. Essas coberturas vulcânicas alteram não só a composição desses solos, acrescentando significativos teores de minerais metálicos, como também sua permeabilidade e interação com as águas subterrâneas, tendendo a torná-las bastante ácidas.

O conhecimento dessas estruturas geológicas e do processo de ocupação agrário/urbano/industrial ajuda a compreender a dinâmica dos fluxos hídricos pelo território e a dispersão dos agentes poluentes (ROSS, 1997).

O Planalto Atlântico, como área mais elevada, de rochas predominantemente impermeáveis é o principal dispersor de águas que correm para duas vertentes, a do leste, com rios curtos e encachoeirados, que logo deságuam para o oceano e a vertente oeste, com rios extensos e volumosos, dos quais o rio Grande ao Norte, o Tietê no centro e o Paranapanema no Sul são os principais cursos. Sendo o Planalto Atlântico a unidade com maior ocupação urbano industrial, os fluxos que partem dessa unidade tornam-se assim grandes dispersores desta carga de poluentes que se espalha pelo território paulista. Na baixada litorânea os contrafortes da Serra do

Mar, onde a Mata Atlântica ainda está mais preservada, sofre a ação desse processo contaminante, ao mesmo tempo em que gera uma barreira natural de filtragem, diminuindo a carga de despejo poluidor em direção ao oceano (SIGRH, 2003). Por outro lado, é na baixada litorânea que o município de Cubatão, que carrega um longo histórico de poluição industrial, mesmo seguindo a partir dos anos 80 normas mais rigorosas no controle de rejeitos, ainda tem a herança de solos e corpos hídricos contaminados das décadas passadas de má gestão ambiental e que continuam, lentamente, a fluir pelo entorno dos municípios vizinhos (OLIVEIRA; GUERRA, 2011).

A Depressão Paulista encontra uma faixa crítica no seu contato com o Planalto Atlântico, na medida em que águas carregadas de rejeitos de esgoto urbano do leste escoam das rochas impermeáveis diretamente para a área de recarga do aquífero. Combinado com a presença de lixões nessa região e atividades agrárias com alto uso de insumos, esses fatores podem, a longo prazo, comprometer a qualidade da água de todo aquífero (SIGRH, 2003).

A porção oeste do Estado, graças à presença de solos de boa fertilidade, tornou-se desde a expansão da cafeicultura no início do séc. XX uma das regiões de mais intensa exploração agrícola do país, com predomínio hoje do modelo agroindustrial que faz intenso uso de insumos químicos e que também acabam chegando aos lençóis subterrâneos, com menos velocidade devido a impermeabilidade das camadas de rochas vulcânicas sobre a lixiviação.

O oeste paulista tornou-se também, desde os anos 80, área de atração urbana industrial, que geram novos fluxos mais dispersos e com crescimento contínuo de aterros e lixões a céu aberto, quase sempre sem seguir as normas de qualidade sanitária que a legislação ambiental exige (OLIVEIRA; GUERRA, 2011).

Importante ressaltar também que as rochas cristalinas do Planalto Atlântico apresentam veios significativos de minerais metálicos, como é característico dessas estruturas geológicas, que levaram a formação de áreas de garimpo bastante pretéritas e outras de extrativismo mineral mecanizado, principalmente na porção sul do planalto, assim com grandes jazidas de extração de rochas para construção civil (granito) e calcário nas faixas de transição com a Depressão Periférica. Como essas atividades se iniciaram em momentos históricos onde a preocupação ambiental não existia e as legislações eram muito vagas, essas atividades deixaram também nos seus entornos significativas heranças de pontos de contaminação.

Segundo Soares, (2004), os métodos estatísticos adotados pela CETESB para monitorar a disponibilidade e transferência de metais potencialmente tóxicos no solo no Estado de São Paulo são bastante imprecisos. O método principal de aplicação é o Coeficiente de Distribuição Sólido – Solução ( $K_d$ ). Esse coeficiente de análise da adsorção de metais no solo depende de um conjunto bastante amplo de variáveis, como pH, teor e tipo de argilas e materiais orgânicos, entre outros. Isso levou agências internacionais de meio ambiente a estabelecerem coeficientes que a CETESB aplica de modo mais ou menos padronizado, embora sem haver, até 2004, estudos que indicassem a adequação desses valores à realidade dos solos do Estado de São Paulo. Embora o estudo de Soares e outros do mesmo período apontem valores de  $K_d$  obtidos à partir de análises experimentais com diferentes classes de solos brasileiros, e que apresentam diferenças significativas nas médias dos padrões internacionais, o levantamento junto ao site da CETESB não indica se a agência passou a adotar esses novos modelos até o presente, levantando dúvidas sobre a validade dos parâmetros de contaminação de solos e água por metais potencialmente tóxicos disponíveis até o momento.

#### **3.4.3. Descarte de resíduos sólidos no Estado de São Paulo e contaminação por metais potencialmente tóxicos.**

O solo sobre o qual se faz o descarte do lixo das grandes cidades tende com o tempo a ficar desprovidos de atributos físicos e químicos básicos para que a atividade biológica possa permanecer ativa. Quando não são feitos sistemas de tratamento e impermeabilização, esses pontos da superfície tornam-se focos de dispersão de agentes contaminantes que chegam ao lençol freático e desequilibram a composição das águas, podendo torná-las impróprias para as atividades humanas, como consumo direto ou irrigação (BOSCOV, 2008)

A reabilitação desses ambientes é difícil e onerosa. Segundo dados da ABRELPE de 2018/2019 no Brasil, das 79 milhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerados, 6,3 milhões de toneladas não foram recolhidas dos locais de geração e cerca de 29 milhões das toneladas recolhidas foram despejadas em locais sem controle e adequação para conter os riscos de contaminação.

Os RSU são fontes potencialmente significativas de liberação de metais tóxicos, presentes em descartes de pilhas, baterias e materiais eletrônicos,

borrachas industriais, entulho de material de construção, rejeitos industriais, auto-peças etc.

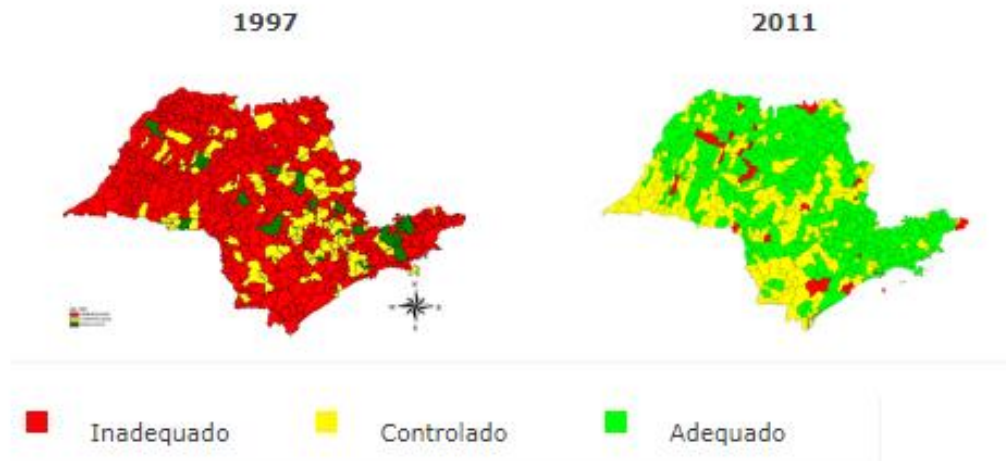
No Estado de São Paulo, o esforço de órgãos fiscalizadores contribuiu para que, na última década, 618 municípios (95,5% do total) atingissem a meta de destinar o lixo urbano em aterros enquadrados como condição adequada e 28 aterros ainda em condição imprópria, sem qualquer controle ambiental (ASSUMPÇÃO, 2020). No entanto, não se pode desconsiderar que os antigos lixões, muitos deles desativados, deixaram um passivo de solos contaminados e que em sua maioria não recebem qualquer técnica de tratamento de solo e remediação.

Para monitorar a condição desses depósitos de lixo pelo interior do Estado, a CETESB adota o Índice de Qualidade de Aterro de Resíduos (IQR), o Índice de Qualidade de Aterro de Resíduos em Valas (IQR-Valas) e o Índice de Qualidade de Usinas de Compostagem (IQC) distintos em duas faixas de enquadramento, em função da pontuação obtida: 0 a 7 – inadequada; 7 a 10 – adequada (ASSUMPÇÃO, 2020), cuja evolução espacial pode ser verificada na Figura 16.

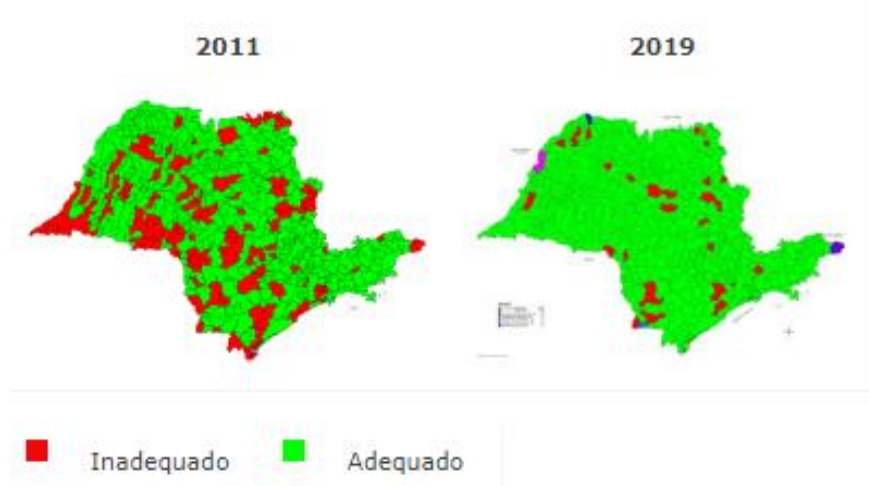
O IQR é um índice aplicado a partir da análise de um conjunto de dados analisados em visitas técnicas aos depósitos de lixo municipais que avalia parâmetros com diferentes pesos de pontuação quanto a adequação dos depósitos dentro dos parâmetros estabelecidos como ideais pela CETESB. Esses parâmetros tomam por base um amplo conjunto de variáveis que vão desde a presença de portaria para controle de entrada de pessoas até presença de chorume e sistema de impermeabilização do solo. Nas duas últimas décadas houve expressiva evolução do IQR conforme pode ser verificado na Figura 16, com os 28 aterros que ainda estão classificados como impróprios desde 2019. Importante ressaltar que à partir de 2011 o IQR passou a ser definido sob nova metodologia, com a eliminação da categoria “controlado”.

Figura 16– Evolução do Índice de Qualidade dos Aterros de Resíduos no Estado de São Paulo

IQR – Índice de Qualidade de Aterro de Resíduos no Estado de São Paulo – Tradicional



IQR – Índice de Qualidade de Aterro de Resíduos no Estado de São Paulo



Fonte: CETESB / RESÍDUOS SÓLIDOS 2020

#### 3.4.4. Contaminação do solo por atividades mineradoras

Toda atividade mineradora implica em impactos que vão da supressão da cobertura vegetal, alteração dos fluxos hídricos até a liberação de resíduos. Os planos de manejo configuram tentativa legal de regularizar essa atividade e

estabelecer procedimentos que reduzam esses impactos ecológicos e sociais. Infelizmente, esses procedimentos são frequentemente burlados. Em outros locais de atividade mais antiga, os passivos de contaminação permanecem ainda presentes, mesmo com a desativação das mineradoras por não estarem adequadas aos padrões de exigência atuais (MENCHI; SANCHES, 2010).

Quanto a geração de resíduos a extração mineral pode ser dividida em duas categorias principais: os recursos não metálicos e os recursos metálicos.

Nos recursos não metálicos os impactos tendem a ser mais de ordem física no ambiente. Liberação de carga de sedimentos assoreando corpos d'água, alteração da rede hídrica superficial e subterrânea, alterações climáticas decorrentes da retirada de vegetação. Alterações químicas contaminantes dessas atividades são menos expressivas e decorrem de alterações do pH das águas do entorno das faixas de extração (principalmente das jazidas de calcário) e alguns produtos químicos como óleo de maquinário que irregularmente chegam aos corpos d'água. No Estado de São Paulo a extração de recursos minerais não metálicos está presente em quase todas as microrregiões onde se destacam areia e argila, calcário, rochas ornamentais e rochas para construção (MENCHI; SANCHES, 2010).

A extração de minerais metálicos tende a ser potencialmente mais perigosas, com riscos de contaminação química, principalmente em jazidas de metais potencialmente tóxicos onde a empresa extratora não segue os protocolos corretos de gestão e monitoramento dos rejeitos. Por razões ligadas ao histórico geológico e processos de formação das estruturas terrestres, as jazidas de minerais metálicos concentram-se de modo quase absoluto nas estruturas cristalinas do pré-Cambriano (principalmente derrames proterozóicos). No Estado de São Paulo, apenas no Planalto Atlântico há afloramentos de Escudos Cristalinos, por isso as jazidas de minerais metálicos estão todas na faixa leste do território.

O Vale do Ribeira do Iguape é a área com problemas mais críticos de passivos de ambientes contaminados por extração de metais tóxicos. Até 1996 a empresa Plumbum Mineração e Metalurgia Ltda exerceu extração de chumbo sem atender aos cuidados necessários à contenção de poeira contaminada e rejeitos lançados diretamente nos afluentes da Bacia do Ribeira do Iguape. Nos arredores da área de extração, a média aritmética observada na população de crianças residentes num raio de 2 Km, em Vila Mota, atingiu 37,8 µg/L, correspondendo a quase quatro vezes o valor sugerido pelo CDC (1991) e pela WHO (1995) como limite para

manutenção da saúde das crianças (10 µg dL<sup>-1</sup>). Só nesse bairro, 44 crianças passaram a depender de acompanhamento médico periódico, enquanto 12 necessitavam de intervenção médica, muito provavelmente devido à alta presença de Chumbo no organismo das mães durante a fase de gestação dessas crianças (CUNHA, 2003).

O Município de Itapeva, no sul paulista, mantinha extração significativa de cobre, mas na última década a atividade se manteve praticamente paralisada. Não há registros documentais de que essa atividade tenha provocado alguma forma grave de contaminação ambiental.

Segundo o Informe Mineral do Estado de São Paulo de 2018 (ano base 2017), Cajati é o único município que ainda mantém até essa data a extração de mineral metálico em São Paulo, com uma produção relativamente baixa de Magnetita. Todas as demais atividades extrativas minerais no Estado restringem-se a recursos não metálicos.

#### **3.4.5. Contaminação do solo por efluentes e despejos agrícolas e industriais**

Desde a década de 90 que o Brasil vem apresentando avanços expressivos em políticas de monitoramento ambiental e de exigências mais rigorosas quanto ao licenciamento de atividades produtivas que possam ter algum impacto sobre o meio ambiente. Parte desse rigor nas leis (muitas vezes não concretizada nas ações práticas) provém de uma maior cobrança internacional sobre atitudes que permitam proteger a enorme biodiversidade do país (DA SILVA, 2019)

Nos anos 80 o Brasil abrigava um dos maiores exemplos de poluição industrial do planeta (nos arredores do pólo industrial de Cubatão). Na década seguinte passou a ostentar números expressivos de combate à poluição e de desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, porém, os passivos ambientais dos abusos cometidos no passado continuam a existir, mesmo como no exemplo de Cubatão, onde grandes políticas de reabilitação ambiental foram colocadas em prática.

Se os sistemas de monitoramento sobre mineração e indústrias tornaram-se mais rigoroso, por outro lado, os sistemas de saneamento das águas residuais urbanas continuam bastante deficitários (CETESB, 2020), sendo um forte vetor de

dispersão das partículas poluentes para o subsolo e comprometendo a qualidade ambiental de áreas bastante extensas.

A agricultura de grande escala, por outro lado, passou a ocupar mais espaço na preocupação dos grupos ambientalistas. No campo, o Brasil enfrenta um contínuo processo de “adoecimento” ambiental, que afeta mais imediatamente os trabalhadores rurais e seus familiares e por um processo mais disperso, toda a população, ao ter contato com alimentos e água cada vez mais carregada de produtos químicos tóxicos dispersos em plantações de diferentes escalas. Responsável pelo consumo de 1/5 de todos os agrotóxicos produzidos mundialmente, desde 2009, o Brasil acompanha um avanço significativo da aplicação desses produtos, de 7 quilos por hectare em 2005 para 10,1 quilos em 2011 (BOMBARDI, 2012).

Soja, milho e cana são responsáveis por praticamente 70% de todo o uso de agrotóxicos no Brasil, boa parte desse consumo no Estado de São Paulo. O principal produto químico utilizado nessas culturas é o herbicida glifosato, aplicado “casado” com sementes transgênicas resistentes a esse produto. A aplicação do glifosato mata outros vegetais que possam competir com as sementes transgênicas durante sua germinação, impedindo a concorrência por nutrientes (BOMBARDI, 2012).

Se soja, milho e cana são as culturas que mais consomem herbicidas em valores totais, tomate, maçã e batata-inglesa destacam-se como grandes consumidores de pesticidas em termos relativos, ou seja, essas plantações são as que apresentam maior uso de agrotóxicos por hectare, o que torna suas áreas de cultivo potencialmente mais críticas do que as grandes lavouras de soja, milho e cana, uma vez que tais produtos estão altamente concentrados em pontos da superfície e são exponencialmente mais perigosos (USP ESALQ, 2020).

Não apenas os pesticidas e herbicidas trazem risco à saúde humana e ao ecossistema, mas também os fertilizantes químicos aplicados de modo desordenado. Além da contaminação das águas por compostos nitrogenados que desencadeiam desequilíbrio bioquímico com consequente eutrofização dos corpos d’água, há os fertilizantes fosfáticos que apresentam liberação de chumbo e cádmio. Mesmo em baixíssimas proporções, esses metais tóxicos são bioacumulativos, retendo-se ao longo dos anos a todos os organismos expostos ao seu contato. É possível identificar concentrações significativas desses metais em sementes de milho e soja, onde há uso intensivo de fertilizantes fosfáticos (SILVA, 2007). Esses

dois produtos destacam-se como principais consumidores dos fertilizantes fosfáticos na agroindústria (USP ESALQ, 2020).

## **4. METODOLOGIA**

### **4.1. Complexidade dos estudos ambientais**

Em um meio campo entre as Ciências Sociais e as Ciências Exatas, as Ciências da Vida (como a Biologia, Ecologia e Agronomia) sofrem um expressivo nível de relatividade em função do grande número de variáveis que abarcam, dependendo de condições espaciais e temporais bastante específicas, onde um procedimento pode ser eficaz em dada situação e totalmente inadequado em outra, mesmo quando aparentemente semelhantes. Essa complexidade das Ciências Naturais abre controvérsias bem embasadas e necessárias no âmbito acadêmico, mas também, dão margem a visões parciais, ligadas a dogmas ideológicos, interesses econômicos ou políticos, que invariavelmente se aproveitam dessas controvérsias e de modo intencional ou não, acabam dificultando a compreensão das estratégias de intervenção antrópica, voltadas à exploração da produtividade dos recursos naturais (GRAZIANO; GAZZONI; PEDROSO, 2020).

Sob a atual radicalização político-ideológica que o país (e o mundo) enfrenta, tanto as críticas quanto a defesa do agronegócio e de seus procedimentos, mais do que nunca, necessitam de acuidade e atenção do meio acadêmico. Essa complexidade pode ser claramente vista, por exemplo, nas pesquisas sobre uso de agrotóxicos no Brasil. Referência nos últimos anos como estudo sobre a regionalização dos agrotóxicos no território brasileiro, o livro “Geografia do Uso de Agrotóxicos no Brasil e Conexões com a União Europeia” da Geógrafa Larissa Mies Bombardi aponta o Brasil como maior consumidor mundial de agrotóxicos. As críticas a essa posição, vinda principalmente de defensores do agronegócio brasileiro, afirmam que essa colocação não leva em conta a relação com a área plantada do território. Ao dividir-se o volume de agrotóxicos por área plantada, os países da União Europeia como Itália, França, Espanha, Alemanha, Polônia, além de Reino Unido, Japão, Coreia, Austrália, Canadá, Argentina e Estados Unidos acabam empregando quantidades bem superiores de agrotóxico por hectare do que os produtores brasileiros (AGROSABER, 2019). Mas essa mesma crítica não leva em conta como esses agrotóxicos estão distribuídos pelo Brasil, contabilizando a área de grandes florestas no norte do país ou das regiões pouco povoadas do sertão

nordestino dentro da mesma média de comparação. Essa polêmica evidencia o quanto é difícil se estabelecer uma metodologia de análise de impacto ambiental, mesmo com base em dados estatísticos, não se deixando pender para um ou outro modo “preferencial” de se avaliar a problemática.

#### 4.2. Mapeamento dos resíduos agroindustriais

O mapeamento foi produzido com o volume de produção agrícola e resíduos sumarizados em uma planilha, usando o *software* Microsoft Excel® 2007 e avaliados por Micro Regiões Administrativas do Estado de São Paulo.

Segundo o site da EMBRAPA - Macrologística da Produção Agropecuária Brasileira, os principais produtos do setor agroindustrial brasileiro são algodão, café, cana de açúcar, laranja, madeira (de pinus e eucalipto), milho, soja, além da pecuária de bovinos, galináceos, suínos e do cultivo geral de outros grãos (arroz, feijão, trigo etc). Analisando-se a produção do Estado de São Paulo nesse site, é possível chegar-se às fontes primárias de dados coletados do IBGE, conforme a Tabela 2:

Tabela 2 - Fonte primária de dados sobre produção agroindustrial brasileira

| Produtos                                                            | Sistema    | Endereço WEB                                                                                                                          |
|---------------------------------------------------------------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| algodão, café, cana de açúcar, laranja, milho, soja, arroz e feijão | IBGE – PAM | <a href="https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas/brasil/2018">https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas/brasil/2018</a>   |
| madeira para papel e celulose (pinus e eucalipto plantado)          | IBGE- PEVS | <a href="https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pevs/quadros/brasil/2018">https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pevs/quadros/brasil/2018</a> |
| Pecuária para corte: bovinos, galináceos e suínos                   | IBGE- PPM  | <a href="https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/ppm/quadros/brasil/2018">https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/ppm/quadros/brasil/2018</a>   |

Fonte: o autor

#### 4.3. Levantamentos cartográficos do Estado de São Paulo

Para a produção dos mapas para o SIG foi usado o software livre QGIS (Versão 3.10.13) de código-fonte aberto, uma multiplataforma de sistema de

informação geográfica que permite a visualização, edição e análise de dados georreferenciados, tanto para formatos vetoriais como matriciais.

Para a construção dos mapas do SIG a partir do aplicativo QGIS foi necessária a obtenção de arquivos do tipo *Shapefile*. Trata-se de um modelo de arquivo com dados geoespaciais em formato vetorial e boa interoperabilidade com outros formatos de arquivos, em especial arquivos do tipo .xl e .xm para correlações com planilhas Microsoft Excel®.

As bases de dados de extração do mapa de microrregiões do Estado de São Paulo foram descarregadas diretamente do site do IBGE (geociências / estrutura territorial). O *datum* do mapa de microrregiões do Estado de São Paulo é o EPSG:4674 - SIRGAS 2000 e a Geometria é Polygon (MultiPolygonZ).

O mapa de solos do Estado de São Paulo foi obtido a partir de arquivos da última atualização de solos do Estado (2017), feita por Márcio Rossi, baixada do site do Instituto Florestal do Estado de São Paulo. Essa base de mapas foi comparada com dados do mapa de solos do Instituto Agrônômico (IAC) e fontes textuais de categorização de solos da EMBRAPA- SOLOS.

O *datum* do mapa de solos é o EPSG:4326 - WGS 84 – Geográfico e a Geometria é Polygon (MultiPolygonZ).

O mapa de solos serviu como base de dados para a elaboração do mapa de potencialidades de aplicação do biocarvão.

Para a produção do Mapa de Riscos de Contaminação do solo do Estado de São Paulo foi produzida uma sobreposição de mapas vetoriais temáticos obtidos do site da CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo e do site da DATAGEO – Sistema Ambiental Paulista, também obtido do site da DATAGEO. O *datum* e o SRC desses mapas, de acordo com os próprios sites, é indefinido. Essas informações foram interpoladas ao mapa de Macro-Unidades de Relevo do Estado de São Paulo, com *datum* EPSG:4674 – SIRGAS 2000, também obtido no site da DATAGEO.

Os valores relacionados à produção agrária das microrregiões do Estado de São Paulo foram baixados do sistema SIDRA do IBGE, Sistema IBGE de Recuperação Automática. Desse sistema foram acessados três bancos de dados distintos: PAM – Produção Agrícola Municipal; PPM – Pesquisa Pecuária Municipal e PEVS – Produção da Extração Vegetal e Silvicultura; com dados de 2018 e 2019.

## **5. RESULTADOS**

### **5.1. Levantamento sobre as características dos resíduos agroindustriais gerados no Estado de São Paulo**

O Estado de São Paulo, juntamente com o Paraná, concentra a mais representativa agroindústria do país, tanto pelo volume, como pela diversidade de produção, como pelo alto emprego tecnológico. Segundo o Censo Agropecuário Brasileiro, agroindústria é definida como “atividades de transformação e beneficiamento de produtos agropecuários de origem animal ou vegetal, que foram realizadas em instalações próprias, comunitárias ou de terceiros, a partir de matéria-prima produzida no próprio estabelecimento agropecuário ou adquirida de outros produtores” (IBGE/SIDRA, 2018).

Os resíduos agrícolas e pecuários provenientes da agroindústria tendem a ter caráter mais homogêneo e volumes significativos do que outras fontes, como os resíduos urbanos ou resíduos das pequenas produções familiares, além de estarem associados a altos impactos no ambiente justamente pela dificuldade, algumas vezes, de se encontrar destinação ao alto volume gerado, sendo interessante o desenvolvimento de metodologia para aproveitamento e transformação desta classe de resíduos sólidos.

Segundo dados do Sistema de Inteligência Territorial Estratégica da Macrologística Agropecuária Brasileira da Embrapa de 2016, os principais produtos em volume de produção no Estado de São Paulo são: algodão, café, cana-de-açúcar, laranja, madeira (pinus e eucalipto) grãos (com destaque para arroz, feijão, milho e soja) e a pecuária de bovinos, galináceos e suínos, sendo assim os produtos abordados nesta pesquisa.

As produções de menor escala no Estado, como tomate, batata e frutas diversas, além de hortaliças, geralmente em pequenas propriedades, também são potenciais geradoras de resíduos, que merecem estudos posteriores estabelecendo suas relações georreferenciadas comparadas às potencialidades de aplicação de biocarvão.

### 5.1.1. Algodão

A velocidade com que a cotonicultura brasileira tem crescido pode ser expressa pela evolução de sua posição no comércio global no início do séc. XXI. De grande importador dessa matéria prima em 2003, tornou-se em 2013 o 3º exportador mundial. Essa evolução deu-se principalmente pela incorporação de novas técnicas de manejo e biotecnologia, uma vez que a área plantada reduziu-se para menos da metade enquanto a produtividade evoluiu de 300 kg/ha para 3.885 kg/ha (EMBRAPA, 2016).

Após a colheita da pluma, há uma quantidade considerável de biomassa residual, composta de folhagens e hastes. Essa matéria orgânica não pode permanecer exposta na superfície por atraírem pragas como o bicudo. O aterramento desse material demanda custos e muitas vezes degradam a estrutura do solo (COATES, 2000).

Com isso, veio ocorrendo um significativo interesse pelo aproveitamento energético dessa biomassa por processos biológicos (biodigestão e fermentação) ou mais frequentemente, por processos termoquímicos (pirólise, liquefação e gaseificação) (ANEEL, 2008).

As empresas algodoeiras estão localizadas, em geral, próximas das zonas de cultivo para reduzir custos de transporte. Nessas indústrias é feito o descaroçamento do material colhido, gerando dois produtos, a fibra de algodão propriamente dita, que segue para prensagem, e os caroços destinados a briquetagem ou produção de óleo, que após tratamento térmico são destinados a consumo humano (SOUZA, 2002). Os caroços também são empregados na alimentação de ruminantes que apresentam resistência ao gossipol, substância tóxica para o consumo humano (CARVALHO, 1992).

Os briquetes de caroço de algodão comercializados no Brasil apresentam Poder Calorífico Superior (PCS) na faixa de 16,92 a 17,64 MJ/kg, mas para exportação as normas técnicas são adaptadas às exigências do país importador (EMBRAPA, 2012, apud DA SILVA, 2019).

Segundo dados de Cotton (1996b, apud DA SILVA, 2019), a cultura algodoeira é responsável por mais de 10% dos pesticidas consumidos mundialmente, caracterizando-se como uma cultura de alto impacto sobre a microbiologia do solo. Ao mesmo tempo, as pragas que afetam a produção algodoeira têm aumentado sua

resistência a esses agrotóxicos, exigindo que se apliquem cargas cada vez mais nocivas.

A incidência de pragas na cultura algodoeira tende a crescer nas baixas latitudes e por isso são uma preocupação constante do setor no Brasil. Como alternativas para contornar a necessidade de agrotóxicos cada vez mais fortes, Santos, (2019), aponta: a retirada imediata da matéria orgânica remanescente no solo logo após a colheita, o uso de tecnologias de controle biológico através da introdução de insetos que atacam as pragas e a rotação de cultivos, com alternância das culturas anuais.

Estudos que apontam possibilidades de uso dos resíduos de algodão para a obtenção de biocarvão são bastante expressivos, indicando a possibilidade de tratamento de sobra de moagem de caroço para produzir corretivos de solo ou catalisador de corantes presentes em efluentes das indústrias de tingimento (PRIMAZ, 2018), ou tratamento térmico das bagas e ramas em melhoramento de solos para cultivo de milho (ESPINOZA, 2015).

O alto volume de matéria orgânica já aproveitada como biomassa para queima energética, atrelado à necessidade de recomposição microbiológica de solos sob ataque de agrotóxicos e a melhoria destes para permitir a introdução de outras culturas em sistema de rotação, são indicativos da forte potencialidade de aplicação dos projetos de biocarvão nas regiões com alta produção algodoeira.

### **5.1.2. Cana de açúcar**

A cana de açúcar é um dos principais produtos agrícolas da economia brasileira, tanto pelo seu referencial histórico quanto pelo volume de produção, colocando o Brasil como primeiro exportador mundial. Não há indícios de redução de sua produção em curto prazo, seja pelo crescimento da demanda mundial por açúcar como pelo consumo de etanol.

No caso do açúcar, em 2016, o consumo mundial foi de 174 milhões de toneladas, enquanto a produção foi de 171 milhões, obrigando o uso de estoques. Por outro lado, a média de consumo per capita dos brasileiros é de 52 Kg / ano, bem acima do restante do mundo, de 22Kg/ ano. (EMBRAPA, 2016). A mudança de hábitos alimentares apenas do povo brasileiro já poderia assim, a médio prazo,

diminuir a pressão sobre essa demanda, mas não há indicativos de que essa mudança de hábito tenha adquirido força significativa.

Quanto à produção de álcool combustível, os volumes sofrem flutuações bastante complexas em função de inúmeros fatores que influenciam no consumo, como o preço do petróleo no mercado mundial até as tendências da política nacional de combustíveis e de subsídios aos produtores de cana.

Do ponto de vista ambiental os canaviais sempre estiveram envolvidos em polêmicas discussões pelos inúmeros impactos que sua produção traz ao ecossistema, seja pela acelerada degradação que traz ao solo, seja pelos resíduos contaminantes liberados. Dados do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) de 1995 apontavam que 11% dos resíduos provenientes da produção agrícolas vêm dos canaviais e a queima desses resíduos gera significativa liberação de GEEs (Gases de Efeito Estufa) (RONQUIM, 2010).

Quando a produção de cana de açúcar começou a se disseminar pela região sudeste do Brasil nos anos 70, em função do programa Proálcool, os problemas relacionados à gestão desses resíduos já se mostravam controversos.

Ao ser feito o corte e descascamento da cana durante a colheita, uma massa significativa de biomassa fica no ambiente. Quando não é queimada, há proliferação de roedores silvestres invasores, vindos dos fragmentos florestais próximos, que podem transmitir através da urina o Hantavírus, contaminando os cortadores de cana com a pneumocistose, uma síndrome respiratória e cardíaca de risco letal. Há também a proliferação de cigarrinhas invadindo as áreas ainda não cortadas, e que trazem expressivas perdas de produção (ANDRADE, 2007).

Por outro lado, a queima desses resíduos ao ar livre além de prejudicar a manutenção da microbiologia do solo, libera teores de substâncias poluidoras do ar bem acima de outras culturas em que também se pratica a queimada. Junto com a liberação expressiva de fuligem e fumaça, liberam-se Gases de Efeito Estufa, como óxido nitroso ( $N_2O$ ), metano ( $CH_4$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Mas, é importante ressaltar que o  $CO_2$  liberado não é contabilizado como uma emissão líquida, uma vez que as plantas de cana sequestram carbono atmosférico na mesma quantia ao longo do seu crescimento (RONQUIM, 2010).

As queimadas afetam municípios próximos aos canaviais, trazem riscos diversos de acidente quando fogem do controle (fumaça nas estradas, risco de atingir redes elétricas etc.), mas afetam principalmente os trabalhadores de

canaviais. Constata-se, por exemplo, que eles apresentam na urina teores de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA) em níveis muito acima das recomendações de saúde, sendo essa uma substância cancerígena, absorvida pela inalação de fumaça da cana (BOSSO, 2000, apud ANDRADE 2000).

Por todos esses problemas, uma série de leis foram estabelecidas visando eliminar a prática de queimadas de resíduos no campo, além de protocolos estabelecidos pelos próprios produtores agrícolas, verificando-se que, em 2020, embora essas práticas ainda ocorram, estão em níveis cada vez menos frequentes em comparação a décadas anteriores. A eliminação das queimadas só seria possível com a mecanização completa da colheita de cana, o que implica em investimentos em maquinário e perda de empregos de trabalhadores rurais. O Decreto 42.056/97 já proibia no Estado de São Paulo a queima da cana como método auxiliar à colheita. Mesmo estabelecendo um cronograma gradual de prazos de eliminação, muitas empresas do setor apontaram a inviabilidade econômica e técnica para adequarem-se a esses prazos. Em 2002, nova Lei Estadual 11.241/2002 estabeleceu um novo cronograma para eliminação das queimadas de canaviais, considerando os ciclos quinquenais de renovação dessa cultura, estipulando um prazo limite até 2031. Em 2006, as indústrias de açúcar e álcool do Estado de São Paulo, seguindo diretrizes da União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA), estabeleceu um novo protocolo em que, até 2014, nas “áreas mecanizáveis” as práticas de queimadas seriam totalmente abandonadas (RONQUIM, 2010).

A eliminação da prática de queimadas no campo trouxe um novo desafio para os produtores, que era gerenciar um volume ainda maior de massa orgânica nas usinas de açúcar e álcool. A introdução de tecnologias e aprimoramentos em bioengenharia reduziram significativamente algumas porcentagens desses resíduos, obrigando uma relativização dos dados obtidos por pesquisa bibliográfica com mais de uma década. Esses aprimoramentos deram-se tanto pela introdução nas plantações de cana geneticamente modificada, com maior porcentagem de sacarose e etanol, pela geração de novas cepas de levedura mais eficientes na fermentação de cana e também pela aplicação de técnicas mais racionais de manejo da colheita.

Boa parte dos resíduos da produção final de álcool e açúcar decorre do teor de impurezas que acompanham a cana, da área de extração até a entrada na usina. O teor de impureza vegetal que chega às usinas depende assim dos fatores: tipo de

cana, técnica de cultivo e colheita, maquinário empregado e sazonalidade da colheita. As médias brasileiras são: 29 % das usinas recebem dos canaviais 3,5 % de impurezas vegetais (nível considerado ótimo), 48 % das usinas recebem a cada tonelada de cana entre 35 a 65 kg de impurezas vegetais e 23 % das usinas ainda recebem 65 kg de impurezas vegetais por tonelada de cana. (DINARDO-MIRANDA; VASCONCELOS; LANDELL, 2008)

Além de gerar mais resíduos finais, reduzindo a eficiência da fermentação, as impurezas vegetais da cana aumentam o desgaste do equipamento, trazem problemas operacionais nas caldeiras e elevam o custo do transporte. Isso explica por que boa parte das pesquisas com produção de cana na atualidade visa reduzir as porcentagens de resíduos vegetais do produto bruto.

Comercialmente, os principais produtos esperados da cana são o Açúcar (Sacarose –  $C_{12}H_{22}O_{11}$ ) e o Álcool (Etanol –  $CH_3CH_2OH$ ) e em segundo plano a Bioeletricidade (Energia da biomassa). Estratégias diversas vêm sendo aplicadas para que os resíduos sejam destinados a outras finalidades que possam beneficiar o próprio canavial, para atividades exercidas em consórcio na mesma propriedade, como alimentação para gado ou como biomateriais comercializáveis que agreguem valor à toda cadeia produtiva.

Os principais resíduos pós processamento da cana são o bagaço, a torta de filtro e a vinhaça.

O bagaço, que é o resíduo do esmagamento da cana para extração de caldo representava, segundo os parâmetros técnicos da década de 80, 30% do peso dessa matéria-prima. Esse material contém alto teor de ligna e é apreciável para a alimentação de ruminantes após submetido a fermentação, ensilagem, desidratação, peletização e peneiramento (CARVALHO, 1992).

Em 2001, com a crise de energia elétrica, o bagaço passou a ser combustível escasso, de valor econômico significativo, tornando-se matéria prima para usinas termelétricas movidas à biomassa. A queima de bagaço de cana está relacionada a liberação de quantidades consideráveis de material particulado, óxido de nitrogênio e dióxido de carbono. Para controle da emissão do material particulado, que tem expressivo potencial cancerígeno para as populações do entorno das usinas, geralmente, empregam-se lavadores de gases, com resultados relativamente satisfatórios de retenção (ANDRADE, 2007).

A torta de filtro de usina é resíduo industrial da purificação do caldo nas usinas, resultado da clarificação e purificação do caldo, através do emprego de polietróitos produzido na proporção de 1% a 4% da massa de cana moída (para cada tonelada de cana obtém-se em média 25 Kg de torta de filtro) sendo reaproveitada com frequência na alimentação do gado e também como fertilizante e composto orgânico no canavial (CARVALHO, 1992).

Por tratar-se de um lodo decantado em tanques de fermentação, apresenta concentração de metais como alumínio, manganês, zinco e ferro. Ao se despejar a torta de filtro no solo, esses metais podem percolar, chegando às camadas freáticas (ANDRADE, 2007).

O vinhoto ou vinhaça é um líquido resultante da destilação do álcool, tratando-se de um resíduo de volume final bastante considerável, com uma média de liberação de 13 litros de vinhaça para cada litro de álcool produzido, resultando uma média de 800 litros de vinhaça por tonelada de cana. Apesar de apresentar um potencial nutritivo, o volume de água a ser removido é elevado, é pouco viável sua secagem para redirecionamento à obtenção de ração (CARVALHO, 1992).

Ao sair dos tanques, a vinhaça está em temperatura elevada. Possui pH ácido; corrosividade; alto teor de potássio; quantidades expressivas de nitrogênio e fósforo e por isso seu despejo em cursos d'água resulta em expressiva eutrofização e degradação da fauna aquática.

Em geral a vinhaça é despejada por diversos meios de volta ao canavial, visando a recomposição de nutrientes ao solo. Isso exala odores fortes e desagradáveis, além de estimular a propagação de moscas.

Em algumas situações, a liberação massiva de vinhaça no solo pode ser considerada potencialmente poluidora, uma vez que há uso de soda cáustica nas operações industriais. Assim, o acréscimo de sódio ao solo pode colmatar, salinizar e erodir solos arenosos que predominam no Noroeste do Estado de São Paulo (ANDRADE, 2007).

A cultura da cana é assim uma das maiores liberadoras de resíduos de biomassa. Apesar de todas elas apresentarem já alguma possibilidade de reuso, há sempre alguns fatores de empecilho ambiental para cada uma, indicando que a possibilidade de reaproveitamento de biomassa é uma alternativa com relevância para diversificar os usos desses materiais e equilibrar os impactos que trazem ao meio ambiente.

### **5.1.3. Grãos: arroz**

A casca de arroz constitui hoje um dos principais resíduos agrícolas sem aplicação. Por ser rica em fibras, mas pobre em proteínas digestíveis, escasso valor nutritivo, além de altos teores de lignina e sílica que podem trazer problemas no trato renal dos animais, as possibilidades de conversão em ração são limitadas, que não deve ultrapassar 20% da massa total. Além disso, a baixa massa específica da casca de arroz torna os custos de transporte onerosos, limitando seu deslocamento para áreas mais distantes (CARVALHO, 1992).

A casca de arroz é um resíduo gerado na própria usina de beneficiamento, correspondendo a 22% da massa total do arroz com casca. Com poder calorífico de 3200 Kcal/Kg, aproximadamente 15% da casca de arroz residual é utilizada como fonte energética durante o próprio processo de secagem na usina, enquanto os 85% restantes não possuem ainda qualquer tipo de aproveitamento. Classificada como classe II (resíduo sólido não perigoso e não inerte pela NBR 10004), a destinação inadequada da casca de arroz traz passivos ambientais, como material orgânico que se decompõe e pode gerar eutrofização quando lançado em corpos d'água, acidificação dos solos e atração de pragas e vetores de doenças (IBP, 2020).

Na proporção de 0,38 tonelada para cada tonelada de arroz colhido, a palha dos arrozais é reaproveitada no próprio campo após a colheita. Juntamente com as cascas das usinas, o excedente dessa palha tem potencial para conversão em biomassa energética, mas novamente aqui, o problema do alto volume e baixa massa inviabiliza seu uso mais efetivo, tendo até o momento apenas seis termelétricas em operação no Brasil que fazem aproveitamento dessa fonte energética, combinada com outras fontes de biomassa (IBP, 2020).

### **5.1.4. Grãos: café**

Enquanto o Brasil é visto mundialmente como referência no volume de produção de café (maior produtor mundial), Colômbia, Costa Rica, Guatemala ganham destaque no quesito qualidade (EMBRAPA, 2016).

Nos últimos anos, novas concepções produtivas do café trouxeram oportunidades substanciais de rendimento aos pequenos produtores, principalmente no modelo de Agricultura Familiar, buscando diversificar as técnicas de cultivo,

explorando nichos de mercado com cafés orgânicos ou cafés gourmets em que o ganho se dá mais pela agregação de valor ao produto do que no volume em si. Nas grandes propriedades, entretanto, a qualidade do produto final pouco se modificou, concentrando-se mais em tecnologias que trazem aumento da produtividade de sacas por hectare.

O café apresenta expressiva disponibilização de resíduos em sua produção com potencial bioenergético, compostos pela casca externa ou exocarpo, a madeira, o pergaminho ou endocarpo e a película prateada ou perisperma do grão. Segundo estimativas, cada tonelada de café beneficiado resulta em 1,25 toneladas de resíduo composto principalmente pelo pergaminho e a casca externa. Em 2015, isso significou uma disponibilização aproximada de 3.402.000 toneladas de resíduos de biomassa (FARIA, 2016).

Parte desses resíduos já é encaminhada à peletização, e juntamente com a palha, convertidos em ração para gado, na proporção média de 20% do volume das rações. Essa disponibilização se dá entre Julho e Dezembro, coincidindo justamente com o período em que os pastos brasileiros, na sua maioria, estão reduzidos pelos períodos de estiagem do clima tropical austral (CARVALHO, 1992). Assim, embora a proporção de resíduos do café seja equiparável ao volume de produto beneficiado (1,25 tonelada de resíduo para cada tonelada de café beneficiado segundo FARIA, 2016) boa parte desses resíduos encontra já um uso consagrado como complemento de ração animal.

Assim como apresentado anteriormente no caso do algodão, os estudos de Primaz, 2018 e Espinoza, 2015 indicam que o biocarvão obtido em pirólise de casca dos grãos de café pode também ser empregado, respectivamente, para corretivos de solo, catalisador de corantes residuais em efluentes da indústria têxtil, ou para melhoramento de solos no cultivo de milho (ESPINOZA, 2015).

#### **5.1.5. Grãos: milho**

Em termos de valor de produção agrícola total, o milho ocupa a quarta posição entre os produtos de maior destaque no Brasil, ficando atrás apenas da produção bovina, soja e cana de açúcar. Na produção mundial, está em terceiro lugar, atrás do trigo e do arroz. Em muitos países da América Latina o milho é um produto de consumo cotidiano do cardápio da população, mas no Brasil seu consumo ocorre

mais por via indireta, situando-se como um importante ingrediente na indústria de alimentos processados como espessantes, óleo vegetal e colante, enquanto 75% do milho não exportado pelo Brasil sustenta a pecuária intensiva através do fornecimento de ração (EMBRAPA, 2016).

O uso de variedades híbridas, melhoradas e transgênicas diminuiu consideravelmente a necessidade de agrotóxicos e elevou a produtividade das fazendas. Atualmente, em torno de 82% do milho cultivado no Brasil é transgênico (EMBRAPA, 2016).

Uma área de cultivo de milho chega a gerar entre 6 a 12 toneladas ha<sup>-1</sup> de resíduos, podendo esse volume ser ainda maior nas fazendas mais produtivas. Esses resíduos são ricos em nutrientes temporariamente imobilizados. Quando incorporados ao solo, a liberação de nutrientes de retorno se acelera. Quando mantida apenas na superfície, como cobertura morta em plantio direto, essa transferência torna-se muito mais lenta (KONZEN, 2020).

Exceto em algumas pequenas propriedades com produção de subsistência, praticamente toda a produção de milho comercial no Brasil é mecanizada. Ao mesmo tempo em que colhe, o maquinário faz o beneficiamento do grão, retirando folhas, palha, sabugo e caule e vão sendo despejados pela parte de trás da máquina diretamente no solo, onde forma uma camada de matéria orgânica que protege a superfície contra a erosão e ajuda a repor os nutrientes absorvidos. Por outro lado, praticamente toda a palhada fica dispersa nesse ambiente, inviabilizando seu uso para outros fins. Na Europa, alguns tipos de colheitadeiras descartam os resíduos em carreiras, montes, ou depósitos temporários dentro da própria máquina, de modo que essa biomassa possa ser aproveitada posteriormente para outros fins, como produção energética, uma vez que a palhada de milho tem 4.227 KcalKg<sup>-1</sup> de poder calorífero. No Brasil, onde há grande volume de biomassa residual de outros produtos como cana e algodão, parece não haver interesse entre os produtos pela mesma aplicação quanto ao milho, de modo que não há empreendimentos cadastrados na ANEEL sobre geração de energia a partir de biomassa residual de cultivo do milho (IBP, 2020).

Nas pequenas propriedades esses resíduos de palhada são eventualmente reaproveitados localmente em outras atividades além da reincorporação do solo, como alimentação de suínos (sabugo) ou cama de esterco (palha triturada). Há propriedades de diferentes portes que utilizam também sistemas de separação do

sabugo já descascado para a produção de amido de milho, além da comercialização do sabugo fechado para fornecimento de milho verde (KONZEN, 2020).

Isso evidencia que, apesar da existência de pesquisas sobre aplicação da palha, caule ou sabugo do milho para produção de alguma forma de biocarvão, sua possibilidade de aproveitamento, dentro do contexto atual, é praticamente nula.

#### **5.1.6. Grãos: soja e feijão**

O significativo aumento da produção de grãos no Brasil ao longo das últimas décadas mostra um dado ambiental bastante positivo. O aumento da produção se deu de “modo vertical”, ou seja, pelo aumento da produtividade em função da aplicação de novas tecnologias, diminuindo a pressão para desmatamento e ocupação de cerrados pelos setores produtivos da economia agrária. Essa tendência pode ser verificada pela constatação de que a safra brasileira de grãos de 2015/2016 foi de 210,5 milhões de toneladas, em uma área pouco superior a 58,5 milhões ha. Para se atingir esse valor com os meios técnicos de 1972, teria sido necessário plantar 157,6 milhões de hectares. É comum a prática de duas safras de grãos no mesmo campo, onde a mesma máquina que colhe já faz imediatamente o plantio, sem aragem. Boa parte desses resultados são obtidos graças ao emprego da técnica de plantio direto, onde a matéria orgânica das plantas fornecedoras de sementes é imediatamente convertida em cobertura de solo, ajudando na re-adubação e proteção do solo contra a erosão, na mesma medida em que diminui significativamente a geração de resíduos inaproveitáveis (EMBRAPA, 2016).

De todas as culturas de grãos, soja e milho são as que apresentaram crescimento mais expressivo pelo território nacional, enquanto o arroz e o feijão, componentes básicos da cultura alimentar brasileira, sofreram alterações significativas relacionadas à flutuação do preço no mercado e a mudanças nos hábitos de consumo da população. Outros gêneros de grãos como trigo, triticale, aveia e cevada tem sua produção mais concentrada nos Estados do Sul do Brasil, com baixa representação no Estado de São Paulo em comparação a outros grãos, por isso não foram abordados no presente estudo.

Devido às semelhanças morfológicas das plantas e das tecnologias empregadas, a soja e o feijão serão agrupados numa categoria única de análise de resíduos, enquanto o milho e o arroz serão tratados como categorias à parte.

Semelhantes no cultivo, mas diferentes quanto ao destino mercadológico, soja e feijão apresentam algumas diferenças nas etapas de beneficiamento. O feijão é consumido *in natura* no mercado interno, limita-se basicamente às etapas de descascamento, limpeza e ensacamento, enquanto a soja, que atende ao mercado de ração animal e serve como matéria prima importante na indústria alimentícia para centenas de tipos de alimentos industrializados, de óleos vegetais a chocolates, biscoitos e complemento de bebidas lácteas, entre outros (CARVALHO, 1992).

O primeiro resíduo gerado pelo feijão e a soja é a própria casca leguminosa. Secas, elas servem como ração para gado, possuindo expressivo valor comercial, principalmente a casca da soja. Em função da possibilidade de emprego da técnica de plantio direto, praticamente não há outros resíduos provenientes da soja e do feijão que se tornem excedentes sem aproveitamento. O biocombustível obtido com a soja se dá pelo processamento da própria semente e não de resíduos de cultivo (IBP, 2020).

Em algumas áreas de cultivo de feijão, onde as técnicas ainda são arcaicas, ou em propriedades pequenas e dispersas, há resíduos das cascas quando o beneficiamento não retorna ao solo, mas isso se dá em volumes muito pequenos em comparação a outras culturas.

Por outro lado, a intensa mecanização das lavouras de soja e a sucessiva monocultura em safras sucessivas tornam essa cultura altamente impactante sobre o ecossistema, exigindo a inovação constante de práticas de recuperação biológica de solos e introdução de insumos para a sua renovação (EMBRAPA, 2016).

#### **5.1.7. Laranja**

O Brasil é o maior produtor mundial de laranja, respondendo por aproximadamente um quarto da produção em frutas e mais da metade da produção na forma de suco em todo o planeta. A produção de suco é quase toda voltada à exportação, sendo os EUA o principal comprador. A produção brasileira atual de laranja supera 16 milhões de toneladas (EMBRAPA, 2016).

A aplicação da laranja para a produção industrial de suco produz um volume significativamente alto de resíduos, equivalente a 50% da massa da fruta com 82% de umidade total. O elevado teor de umidade dificulta e encarece o processo de secagem, restringindo suas possibilidades de reuso e aplicação, apesar do interesse

das empresas em desenvolver mercado para bagaços úmidos (ALEXANDRINO, 2007).

O bagaço de laranja tem boa aceitabilidade como complemento para ração para gado, entretanto, devido à acelerada deterioração do material, a disponibilidade de bagaço fresco só é possível quando a indústria de processamento de sucos encontra-se próxima das fazendas de gado. Boa parte do bagaço acaba sendo submetido a secagem, peletização e armazenagem a granel, em processos relativamente onerosos. A média geral para as indústrias é de uma tonelada de suco concentrado (aprox. 12 toneladas ou 294 caixas de laranja) que resultam em 1,2 toneladas de *pellet* para rações (CARVALHO, 1992).

Outra aplicação dos resíduos orgânicos de casca de laranja está na indústria alimentícia. A pectina, presente na casca de cítricos, é um composto com alto poder gelificante. É utilizado, por exemplo, na fabricação de iogurtes e outros produtos lácteos para garantir a cremosidade e a textura (DA SILVA, et al., 2018). As fibras da casca podem ser submetidas a hidrodestilação, reduzindo seu amargor, de modo que as fibras sejam incorporadas, por exemplo, na fabricação de massa para bolos, biscoitos e sorvetes industrializadas, podendo diminuir em até 70% o teor de gordura e aumentando o teor de fibras para melhorando a qualidade digestiva desses alimentos (CRIZEL, 2013).

Mesmo com diferentes possibilidades de aplicação, o volume dos resíduos do processamento da laranja é tão grande que o excedente continua sendo lançado para descarte em aterros, sem qualquer forma de reuso. Isso se deve ao fato de que empresas e produtores optam por não investir em infra-estrutura de secagem e desidratação e o mercado ainda não tem demanda suficiente para essa oferta nos usos mais convencionais.

Dada a disponibilidade desse material, as pesquisas sobre biocarvão com bagaço de laranja são abundantes. Feitosa *et al.*, 2017 desenvolveram testes comparativos do biocarvão com casca de banana e bagaço de laranja a temperaturas de pirólise de 400° e 600°C. Em geral, o biocarvão de casca de banana apresentou resultados melhores do que o de bagaço de laranja, como teores de potássio e cálcio mais expressivo. O biocarvão de bagaço de laranja teve maior concentração de carbono, mas a 600°C, com elevado teor de naftalina, inviabiliza sua aplicação agrícola. Os resultados com os dois materiais, quando obtidos a pirólise de 400° C, apresentam potencial significativo como condicionador do solo,

com ligeiras vantagens para a casca de banana em termos químicos e vantagens para o bagaço de laranja quando considerados os fatores logísticos.

#### **5.1.8. Pecuária: bovinos**

O Brasil possui o maior rebanho comercial de bovinos do mundo (desconsiderando a Índia, cujo rebanho não tem finalidade comercial). É grande exportador, tendo como principais compradores Hong Kong, Egito, Rússia, Europa, Irã, China e Venezuela. O consumo interno também é bastante elevado, sendo 80% da produção absorvida pelo próprio mercado interno. (EMBRAPA, 2016).

A criação para corte é quase totalmente extensiva, enquanto a produção intensiva destina-se ao gado leiteiro. Um modelo crescente nos últimos anos tem sido a criação semi-intensiva, onde o gado permanece solto no pasto até certa idade e depois é recolhido para engorda, em sistema confinado. Para se compreender essa evolução, em 2018, em torno de 4,987 milhões de cabeças de bovinos ficaram mantidas em sistema confinado de engorda antes do abate, com crescimento de 3% em relação a 2017 (SCOT CONSULTORIA, 2020).

Os resíduos da produção bovina podem ser divididos assim em 3 categorias: os resíduos da criação extensiva no local de criação, os resíduos da criação intensiva no local de criação e os resíduos de abatedouros.

Durante a criação extensiva, os resíduos da criação do gado bovino permanecem praticamente 100% no pasto, formando matéria orgânica rica em nitrogênio e com poder de recompor a fertilização do solo. Na criação extensiva há um volume consideravelmente alto de resíduos que precisam ser retirados rapidamente para garantir a higiene e saúde do criadouro. A utilização em compostagem ou biodigestores é o destino mais comum desses rejeitos (SCOT CONSULTORIA, 2020).

Por ser uma atividade com perfis diversos e dados ainda inconclusivos sobre porcentagem de produção intensiva, semi-intensiva e extensiva, os resíduos provenientes da pecuária bovina não serão abordados nesta pesquisa, embora não deixem de ter papel expressivo, merecendo aprofundamentos posteriores.

### 5.1.9. Pecuária: granjas de galináceos e suínos

Dados da Embrapa de 2016 apontam o Brasil como segundo maior produtor mundial de aves, atrás do EUA e o maior exportador mundial. Quanto aos suínos, o Brasil ocupa a quarta posição global, tanto em produção quanto em exportação. A cadeia produtiva tem baixa sazonalidade, e apresenta forte caráter retrologístico e alta integração com outras cadeias produtivas, uma vez que as granjas de aves consomem 44% da produção nacional de milho e as de suínos 25%.

As atividades de pecuária intensivas em granjas de aves e suínos resultam em significativa quantidade de resíduos orgânicos entre os quais se destacam compostos de esterco mais subprodutos de secagem que formam a “cama de esterco” e animais mortos nas granjas antes do abate que, mesmo com taxas significativamente reduzidas em função das técnicas modernas de tratamento, ainda constituem uma parcela alta de biomassa animal, em especial nas pequenas propriedades de criação de aves.

Nos abatedouros, os resíduos são ainda maiores:

- Resíduos hídricos: águas residuárias de processos de abate, sangria, efluentes de limpeza do espaço de abate, líquidos de lodo com alto teor de gordura;
- Resíduos sólidos e semi-sólidos: sangue centrifugado, sedimentos de lodo flotado, fezes, vísceras, penas;
- Resíduos gasosos: metano das estações de tratamento dos resíduos líquidos, sólidos e semissólidos.

Parte expressiva desses resíduos, tanto das granjas como dos abatedouros, segue uma logística reversa, convertendo-se por diferentes processos em fertilizante orgânico para as fazendas de grãos que, em muitos casos, trabalham em consórcio ou fazem parte da mesma propriedade agrícola das granjas. (SCHENINI, 2011).

Nas granjas, a cama de esterco formada por serragem, casca de arroz, sabugo de milho triturado ou capim picado recebe os dejetos de animais além de penas e sobras de ração. Os galináceos geram aproximadamente dois quilos em cama de esterco ao longo do seu ciclo produtivo, ou seja, em um lote de 25 mil aves, após os 40 dias de crescimento, acumulam-se 50 toneladas de esterco (JUNIOR, 2011). Nos suínos a produção de esterco varia com a idade, mas desde a gestação até o abate, a média é de 2,35Kg de fezes diária por animal (OLIVEIRA; HIGARASHI, 2006).

Considerando que um suíno de 100Kg leva aproximadamente 8 a 9 meses até o abate, isso resulta em uma carga de aproximada de 600Kg de fezes ao longo de sua vida.

Os resíduos desses materiais são comumente processados de três formas: despejo direto ao solo, compostagem e biodigestores.

O despejo direto ao solo, em especial das camas de esterco, é uma forma de baixo custo, mas pode trazer consequências graves, uma vez que são fontes de eutrofização dos corpos hídricos próximos pelos níveis excessivos de fósforo e nitrogênio que escorrem pela superfície ou que percolam nos solos arenosos. Há também problemas de contaminação tanto das águas superficiais quanto subterrâneas de agentes patogênicos, em especial pela bactéria *Salmonella* (BADO, 2006 apud VICENTINI, 2019). Em pequenas propriedades, onde os dejetos funcionam como sistema de fertilização de culturas conjuntas às granjas, devido ao espaço reduzido para a aplicação de um grande volume de rejeitos, como forma de eliminação do excesso de produção de esterco, mas não levando em contas as reais necessidades nutricionais dos cultivos, os riscos de contaminação ambiental ampliam-se substancialmente.

A compostagem do material antes do seu lançamento imediato ao solo ajuda a eliminar agentes patogênicos, mas exige mão de obra intensiva e diária. Ela resulta em um material mais uniforme quimicamente e em queda significativa do volume pela redução de elemento hídrico do material. Também há uma queda aproximada de 40% do conteúdo de nitrogênio, resultando uma matéria orgânica mais equilibrada para aplicação, inclusive para cultivos em viveiros, estufas e cultivos em sistema de jardinagem. Pelo baixo custo de aplicação do processo e pela capacidade de eliminar boa parte dos agentes patogênicos contaminantes devido às altas temperaturas da bioatividade de fermentação do composto, a compostagem desponta como alternativa econômica e ambiental sustentável para as propriedades avícolas, sendo seu emprego já bastante difundido entre avicultores brasileiros (AVICULTURA INDUSTRIAL, 2019).

A utilização de biodigestores exige maior domínio técnico. Ele traz a vantagem de produzir material composto com qualidades ainda melhores do que o processo de compostagem, redução de volume, valorizando sua logística a ponto de convertê-lo em material comercial, e a obtenção de biogás (gás inflamável) para uso energético nas próprias granjas e o biofertilizantes (líquido orgânico-mineral estabilizado).

Os biodigestores são uma alternativa bastante promissora para aumentar o rendimento produtivo das granjas e reduzir custos energéticos, uma vez que esse setor demanda significativa necessidade de energia elétrica para os sistemas de equilíbrio térmico dos criadouros, seja para aquecimento, seja para amenização de temperatura no espaço de confinamento dos animais (VICENTINI, 2019).

Estudos sobre produção de biocarvão de resíduos orgânicos de origem animal apontam suas possibilidades de emprego em combinação com outros tipos de bioprodutos, inclusive com biocarvões de origem vegetal, pois enquanto o material de origem animal atua como fornecedor de nutrientes ao solo, o material de origem vegetal é um importante fornecedor de carbono de longo prazo (FARIA, 2017).

A criação de material composto por adubos provenientes de compostagem de cama de esterco, já bastante empregada nas áreas de granja, com biocarvão do mesmo resíduo, aponta para horizontes expressivos de pesquisa, uma vez que atuariam como complementares no solo. As camas de compostagem, assim como os adubos de biodigestores, são ótimos fornecedores de curto prazo para os plantios, enquanto os biocarvões funcionam como condicionadores de longo prazo, regulando não apenas o fornecimento de nutrientes, mas atuam também como nichos de microrganismos bioativos do solo e equilibrante de textura (FARIA, 2017).

Uma segunda possibilidade bastante promissora para o emprego da tecnologia de biocarvão nas áreas de produção de granjas está no seu potencial como remediador ambiental. Pesquisas conduzidas por Novais, (2018) com biocarvão de excrementos de aves e palha da cana-de-açúcar em águas residuárias eutrofizadas apresentam capacidade expressiva de adsorção de fósforo e em menor escala, sulfatos, nitratos e cloretos, colaborando justamente com um dos problemas recorrentes no entorno das granjas, como visto anteriormente, onde o descarte excessivo de matéria orgânica sem tratamento nos solos trouxe diversos inconvenientes sobre os corpos d'água, principalmente quanto a alteração da DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), fator desencadeador da eutrofização. Esse biocarvão foi obtido pela pirólise combinada de palha de cana-de-açúcar de dejetos de galinha a temperatura de 350 °C e de 650 °C. A princípio, esse material não apresentou capacidade de adsorção de fósforo, o que só foi possível após processo de dopagem pré-pirólise com  $Mg^{2+}$  e pós-pirólise com  $Al^{3+}$  (NOVAIS, 2018).

Outra pesquisa realizada em Campo Mourão, no Paraná, aponta possibilidades de melhor aproveitamento do lodo de abatedouros (GARCIA, 2016). Esse lodo é, na

maioria das vezes, levado a descarte em aterros sanitários, mas em algumas localidades é utilizado como composto orgânico para agricultura após passar por tratamento térmico e centrifugação para extração de água e gordura. Entretanto, devido aos inúmeros processamentos que passam pelo abatedouro, esse lodo pode acabar carregado por poluentes, como metais potencialmente tóxicos, hidrocarbonetos poliaromáticos (HPAs), bifenilaspolicloradas (PCBs), policlorodibenzodioxinas e furanos (PCDD/F), materiais esses que não deixam de estar presentes mesmo após o tratamento térmico e centrifugação, o que exigiria extenso estudo laboratorial antes da liberação de seu uso no ambiente, o que muitas vezes acaba não sendo realizado. O processo de pirólise dos lodos de abatedouros parece ser uma forma mais racional de destino a esse material, obtendo-se bio-óleo e biocarvão que, ao contrário dos materiais anteriores, pode ter ação adsorvente para remoção de contaminantes. (GARCIA, 2016).

#### **5.1.10. Pinus e Eucalipto**

O Brasil tem aproximadamente 10 milhões de hectares de florestas plantadas de pinus e eucalipto que atende a produção anual aproximada de 18,7 milhões de toneladas de fibra de celulose, colocando o país como maior produtor mundial de celulose de fibra curta (eucalipto) e quarto produtor mundial de celulose. (EMBRAPA, 2016)

Além da pasta de celulose, as plantações de pinus e eucalipto atendem também ao mercado de madeira (tratada, serrada ou lâminas) comercializada com empresas de diferentes portes do setor moveleiro e construção civil. O beneficiamento dessas toras se dá principalmente pelo processo de desdobro, redução volumétrica por serras de fita e circular, através de cortes longitudinais que transformam as toras em ripas, sarrafos, pranchas, tábuas, vigas e caibros (ALTENHOFEN, 2018)

Tanto nos países desenvolvidos como subdesenvolvidos é crescente o interesse no uso de biomassa com potencial renovável para o fornecimento de energia, o que impacta diretamente na busca por carvão vegetal proveniente de florestas plantadas. No território brasileiro, o carvão mineral é uma fonte energética naturalmente escassa. Com a crise de fornecimento de energia elétrica em 2001,

houve um aumento significativo de interesse do setor industrial em adaptar plantas de produção movidas por sistemas termoeletricos (TOMAZ, 2017).

A produção de pinus e eucalipto está relacionada a uma longa cadeia de produção de resíduos que se inicia nas áreas de cultivo e segue para as indústrias de processamento de madeira e para as carvoarias de diferentes portes.

No plantio, os resíduos decorrem da presença de galhos, folhas e cascas das árvores. Em algumas áreas de cultivos opta-se por deixar esses resíduos espalhados sobre o solo, formando uma serapilheira de proteção. No entanto o excesso de resíduos deixados no local pode trazer problemas sobre a silvicultura, como: competição por nitrogênio entre as mudas e o material em decomposição, proliferação de insetos daninhos abrigados sob os resíduos, empecilhos físicos ao crescimento dos brotos, dificuldade de trabalho das máquinas no preparo dos sulcos e covas, acidificação do solo por decomposição da matéria orgânica. No Brasil algumas fazendas ainda praticam a ação de abrir leiras no solo, onde os fragmentos florestais são amontoados e posteriormente, queimados. Com isso, joga-se fora o carbono, o solo desnudado fica mais exposto à ação lixiviadora das chuvas e a microbiologia do solo desaparece (FOELKEL, 2015, apud TOMAZ, 2017).

A retirada da madeira e do material residual do solo ao longo do tempo, sem rotação de cultivos, implica em forte degradação do solo. O acúmulo de nutrientes nos troncos das árvores extraídas, devido a sua elevada biomassa relativa (aproximadamente 74,4% da biomassa numa floresta com 8 anos de idade) resulta em alta exportação de nutrientes. Essa perda torna vital para a manutenção da atividade econômica na propriedade manter um manejo de biomassa e, posteriormente a retirada das árvores, criar métodos intensivos de reposição de nutrientes ao solo (SCHUMACHER, 2003).

É desejável então para um bom manejo das áreas de plantação de pinus e eucalipto que ocorram aplicações planejadas de recompositores de solos durante o plantio e após a extração. O biocarvão, principalmente a partir dos próprios resíduos de folhagem e galhos das árvores, aparece novamente como uma alternativa sustentável para equilibrar o balanço nutricional da floresta. Resíduos de madeira podem sustentar a queima em fornos artesanais de olarias e caldeiras de pequenas centrais e usinas termelétricas (TOMAZ, 2017).

Levadas para as serrarias, as toras de madeira passam por processos de desdobro que apresentam rentabilidade bastante variável, dependendo das técnicas

aplicadas. O rendimento de uma tora de eucalipto varia de 31,03% a 54,66% (média de 43,8%) e das toras de pinus de 44,96% a 52,47% (média de 49,01%). Com isso, constata-se alta geração de resíduos também ao longo das etapas de processamento mecânico (serrarias, fábricas de lâminas e compensados). Muitos destes resíduos seguem destinação inadequada, lançados sem qualquer controle no ambiente. As consequências são o assoreamento e poluição dos cursos d'água e poluição atmosférica, quando queimados. Resíduos de madeira podem ser revertidos em produtos comercializáveis (carvão, biocarvão, cama de aviários, matéria prima para compensados e medium-density fiberboard (MDF) (ALTENHOFEN, 2018).

Um estudo comparativo apresentado na FERTBIO (2016) analisou o potencial como agente estabilizador do solo de um biocarvão de casca de eucalipto com “finos de carvão” (material retido no fundo dos fornos de produção de carvão vegetal). O biocarvão de casca de eucalipto foi gerado a partir de pirólise rápida a 500 °C. Nesse estudo, os “finos de carvão” apresentaram basicidade um pouco superior à do biocarvão ( $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} (1:100)$   $7,5 \pm 0,01$  contra  $7,0 \pm 0,01$ ) e sólidos voláteis de 49,8% contra 90,8% indicando maior estabilidade bioquímica. Isso possivelmente decorreu do fato de que os “fios de carvão” permanecem no forno de produção de carvão vegetal durante 5 a 6 dias, reduzindo sua capacidade de fornecer nutrientes ao solo. O teor de N Kjeldahl dos “fios de carvão” mostrou-se superior ao biocarvão ( $9,4 \pm 0,01$  contra  $3,5 \pm 0,07 \text{ g kg}^{-1}$  de N), mas os teores de N inorgânico do biocarvão ficaram expressivamente superior ao dos fios de carvão ( $196 \pm 0,14$  contra  $69 \pm 0,50 \text{ mg kg}^{-1}$  de N amoniacal+nitrato+nitrato). Para ambos os materiais se estimou boa capacidade de interação dos microorganismos, gerando pela sua porosidade inúmeros sítios de abrigo microbiológicos (LUCON; COSCIONE; ANDRADE, 2016).

## **5.2. Mapeamento dos resíduos agroindustriais**

Obtidos os dados sobre o tipo de resíduos agroindustriais, em função da atividade exercida em cada microrregião do estado, os mesmos foram lançados na Planilha “Síntese de Resíduos Agroindustriais do Estado de São Paulo”. A construção dessa planilha do Microsoft Excel® seguiu a lógica de atribuir os

atributos de produção total, índice residual, co-fator local e volume bruto de resíduos disponíveis.

A produção total refere-se ao valor bruto em toneladas da produção de cada um dos produtos listados obtido nas fontes primárias de dados.

O Índice Residual (IR) indica a percentagem de resíduos ainda não aproveitados. Para cada um dos produtos foi adotado um índice de quanto resíduo há disponível desses produtos ainda sem aproveitamento. Esse valor descarta os resíduos que já são aproveitados de alguma forma (exemplo da casca de laranja peletizada para produção de ração), referindo-se então aos volumes que vão para descarte sem uso e que poderiam ser absorvidos para a industrialização do biocarvão. Os valores de “percentual de resíduos ainda não aproveitados” foram definidos na presente pesquisa por análise da bibliografia estudada sobre resíduos agropecuários e com entrevistas informais com produtores rurais e gerentes de fazenda. Esses índices, entretanto, ainda podem estar bem distantes da realidade, sendo aconselhável uma pesquisa minuciosa e contínua sobre cada um desses produtos para que os dados sejam mais condizentes com a realidade. Esse percentual elaborado é aplicado igualmente a todas as microrregiões do Estado.

O cofator local indica que cada localidade pode apresentar variação quanto à produção de resíduos devido à combinação complexa de fatores, como tecnologia empregada, absorção dos resíduos por outras atividades locais, condições ambientais locais etc. Para que essas diferenças regionais sejam consideradas, a tabela possui esse índice que incide sobre o percentual de resíduo gerado, podendo aumentá-lo ou diminuí-lo. Inicialmente, para todos os produtos e todas as microrregiões o co-fator adotado foi 1. Pesquisas futuras e contínuas sobre a produção em cada microrregião poderão fornecer dados para esclarecer as variáveis de cada localidade.

No volume bruto de resíduos disponível é aplicado os dois índices anteriores (“percentagem de resíduos não aproveitados” e “co-fator local”) chegando-se a uma estimativa de quanto cada microrregião dispõe, em toneladas, de resíduos agro-industriais ainda sem uma forma de aproveitamento, resultando então num volume de biomassa disponibilizável para projetos de conversão em biocarvão.

A Figura 17 indica uma parte da planilha, com uso de cores para distinção visual mais clara dos produtos analisados (algodão/branco; café/marrom; cana/verde etc) enquanto as colunas de co-fator local estão indicadas em azul.

Figura 17– Modelo da planilha de produção agropecuária e produção total de resíduos dentro da arquitetura do SIG

|    | A                            | B    | C             | D               | E              | F              | G              | H          | I           | J           | K           | L           | M          | N           | O           | P            |
|----|------------------------------|------|---------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|--------------|
| 1  | codigo do municipio          |      | algodão total | indice residual | total residual | co-fator local | total residual | café total | indice resi | total resic | co-fator lc | total resic | cana total | indice resi | total resic | co-fator lct |
| 2  | 35035 Adamantina (SP)        |      | 7             | 30%             | 2,1            | 1              | 2,1            | 5542       | 25%         | 1385,5      | 1           | 1385,5      | 5593785    | 50%         | 2796893     | 1            |
| 3  | 35033 Amparo (SP)            |      | 0             | 30%             | 0              | 1              | 0              | 11692      | 25%         | 2923        | 1           | 2923        | 180470     | 50%         | 90235       | 1            |
| 4  | 35016 Andradina (SP)         |      | 0             | 30%             | 0              | 1              | 0              | 151        | 25%         | 37,75       | 1           | 37,75       | 15335820   | 50%         | 7667910     | 1            |
| 5  | 35017 Araçatuba (SP)         |      | 0             | 30%             | 0              | 1              | 0              | 0          | 25%         | 0           | 1           | 0           | 15487566   | 50%         | 7743783     | 1            |
| 6  | 35024 Araraquara (SP)        |      | 0             | 30%             | 0              | 1              | 0              | 555        | 25%         | 138,75      | 1           | 138,75      | 22385125   | 50%         | 11192563    | 1            |
| 7  | 35039 Assis (SP)             |      | 0             | 30%             | 0              | 1              | 0              | 389        | 25%         | 97,25       | 1           | 97,25       | 18396561   | 50%         | 9198281     | 1            |
| 8  | 35006 Auriflama (SP)         |      | 0             | 30%             | 0              | 1              | 0              | 1          | 25%         | 0,25        | 1           | 0,25        | 3916994    | 50%         | 1958497     | 1            |
| 9  | 35022 Avaré (SP)             | 9200 |               | 30%             | 2760           | 1              | 2760           | 3759       | 25%         | 939,75      | 1           | 939,75      | 3682850    | 50%         | 1841425     | 1            |
| 10 | 35052 Bananal (SP)           |      | 0             | 30%             | 0              | 1              | 0              | 0          | 25%         | 0           | 1           | 0           | 15425      | 50%         | 7712,5      | 1            |
| 11 | 35009 Barretos (SP)          |      | 0             | 30%             | 0              | 1              | 0              | 4          | 25%         | 1           | 1           | 1           | 10492800   | 50%         | 5246400     | 1            |
| 12 | 35015 Batatais (SP)          |      | 0             | 30%             | 0              | 1              | 0              | 26162      | 25%         | 6540,5      | 1           | 6540,5      | 7791820    | 50%         | 3895910     | 1            |
| 13 | 35020 Bauru (SP)             |      | 0             | 30%             | 0              | 1              | 0              | 2877       | 25%         | 719,25      | 1           | 719,25      | 11710784   | 50%         | 5855392     | 1            |
| 14 | 35018 Birigui (SP)           |      | 0             | 30%             | 0              | 1              | 0              | 922        | 25%         | 230,5       | 1           | 230,5       | 11456457   | 50%         | 5728229     | 1            |
| 15 | 35023 Botucatu (SP)          |      | 0             | 30%             | 0              | 1              | 0              | 2705       | 25%         | 676,25      | 1           | 676,25      | 6388090    | 50%         | 3194045     | 1            |
| 16 | 35048 Bragança Paulista (SP) |      | 0             | 30%             | 0              | 1              | 0              | 1579       | 25%         | 394,75      | 1           | 394,75      | 24230      | 50%         | 12115       | 1            |
| 17 | 35032 Campinas (SP)          |      | 0             | 30%             | 0              | 1              | 0              | 842        | 25%         | 210,5       | 1           | 210,5       | 3980544    | 50%         | 1990272     | 1            |
| 18 | 35049 Campos do Jordão (SP)  |      | 0             | 30%             | 0              | 1              | 0              | 6          | 25%         | 1,5         | 1           | 1,5         | 0          | 50%         | 0           | 1            |
| 19 | 35044 Capão Bonito (SP)      |      | 0             | 30%             | 0              | 1              | 0              | 7          | 25%         | 1,75        | 1           | 1,75        | 6420       | 50%         | 3210        | 1            |
| 20 | 35054 Caraguatatuba (SP)     |      | 0             | 30%             | 0              | 1              | 0              | 0          | 25%         | 0           | 1           | 0           | 0          | 50%         | 0           | 1            |
| 21 | 35005 Catanduva (SP)         |      | 0             | 30%             | 0              | 1              | 0              | 33         | 25%         | 8,25        | 1           | 8,25        | 10464174   | 50%         | 5232087     | 1            |
| 22 | 35034 Dracena (SP)           | 102  |               | 30%             | 30,6           | 1              | 30,6           | 429        | 25%         | 107,25      | 1           | 107,25      | 7226300    | 50%         | 3613150     | 1            |
| 23 | 35002 Fernandópolis (SP)     |      | 0             | 30%             | 0              | 1              | 0              | 104        | 25%         | 26          | 1           | 26          | 5615900    | 50%         | 2807950     | 1            |
| 24 | 35012 Franca (SP)            |      | 0             | 30%             | 0              | 1              | 0              | 122210     | 25%         | 30552,5     | 1           | 30552,5     | 715020     | 50%         | 3257500     | 1            |
| 25 | 35058 Franco da Rocha (SP)   |      | 0             | 30%             | 0              | 1              | 0              | 2          | 25%         | 0,5         | 1           | 0,5         | 2          | 50%         | 1           | 1            |

Fonte: o autor

Posteriormente os valores de “total” e de “resíduo total” de cada produto foram ligados no QGIS à representação das microrregiões do Estado de São Paulo, em um sistema distinto de camadas vetoriais. Com isso, o usuário ao acessar cada camada terá como resposta um mapa com o indicativo de cada produto, dos resultados por legenda com variação de tonalidades quantitativas.

Dentro do próprio QGIS foi utilizado o recurso de calculadora de campo para fazer a somatória de todas as colunas de informação, produzindo duas novas camadas cartográficas: “produção total geral” e “resíduo total geral”.

Nas atividades pecuaristas (bovinos, galináceos e suínos) os dados de produção total fornecidos pelo IBGE não constam em toneladas de produto e sim em número de cabeças. As estimativas de resíduos foram calculadas com metodologia diferente. Por levantamento bibliográfico se obteve as estimativas de quantos quilos em média cada animal produz pelas fontes diversas até a idade de abate (inclusive decama de esterco). Esse volume foi multiplicado pelo número de cabeças de animal e sobre esse total, aplicada a porcentagem de resíduos não aproveitáveis.

Cada camada foi duplicada, juntamente com os dados da planilha do Excel, ligada à representação vetorial do Estado. Na tabela de atributos (Figura 18), cada produto selecionado gera um novo mapa temático de volume de produção ou de resíduo.

Figura 18– Modelo da Tabela de Atributos dentro do QGIS para a produção dos mapas de “volume de produção” e “volume de resíduos”

mapa prod. total CAFÉ :: Feições de totais: 63, filtrado: 63, selecionado: 0

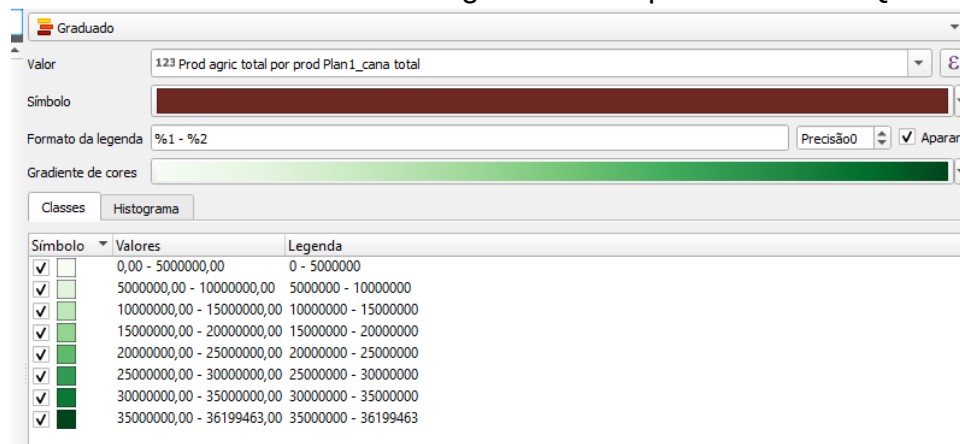
|    | NM_MICRO         | CD_GEOCM | total por prod Plan | total por prod Plan1 | total por prod Plan | total por prod Plan | total por prod Plan1 |
|----|------------------|----------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| 1  | CARAGUATATU...   | 35054    | Caragatatuba ...    | 0                    | 0                   | 0                   | 0 /                  |
| 2  | BANANAL          | 35052    | Bananal (SP)        | 0                    | 0                   | 15425               | 640 /                |
| 3  | ITAPEVA          | 35041    | Itapeva (SP)        | 5400                 | 1579                | 329600              | 415672 /             |
| 4  | RIO CLARO        | 35026    | Rio Claro (SP)      | 0                    | 3448                | 5262736             | 286334 /             |
| 5  | SÃO JOSÉ DO R... | 35004    | São José do Rio...  | 0                    | 360                 | 36199463            | 793431 /             |
| 6  | BRAGANÇA PA...   | 35048    | Bragança Paulis...  | 0                    | 1579                | 24230               | 3125 /               |
| 7  | LINS             | 35019    | Lins (SP)           | 0                    | 1322                | 9657144             | 222980 /             |
| 8  | ANDRADINA        | 35016    | Andradina (SP)      | 0                    | 151                 | 15335820            | 83921 /              |
| 9  | ADAMANTINA       | 35035    | Adamantina (SP)     | 7                    | 5542                | 5593785             | 605 /                |
| 10 | AMPARO           | 35033    | Amparo (SP)         | 0                    | 11692               | 180470              | 35252 /              |
| 11 | BARRETOS         | 35009    | Barretos (SP)       | 0                    | 4                   | 10492800            | 594468 /             |
| 12 | CAMPINAS         | 35032    | Campinas (SP)       | 0                    | 842                 | 3980544             | 38136 /              |
| 13 | SOROCABA         | 35046    | Sorocaba (SP)       | 0                    | 126                 | 1535500             | 126057 /             |
| 14 | MOGI MIRIM       | 35031    | Mogi Mirim (SP)     | 375                  | 1736                | 2019929             | 492721 /             |
| 15 | CAMPOS DO J...   | 35049    | Campos do Jor...    | 0                    | 6                   | 0                   | 38 /                 |
| 16 | BAURU            | 35020    | Bauru (SP)          | 0                    | 2877                | 11710784            | 1241017 /            |
| 17 | LIMEIRA          | 35027    | Limeira (SP)        | 1035                 | 1543                | 7914458             | 241880 /             |
| 18 | JALES            | 35001    | Jales (SP)          | 0                    | 40                  | 5618400             | 309613 /             |
| 19 | SÃO PAULO        | 35061    | São Paulo (SP)      | 0                    | 1                   | 200                 | 0 /                  |
| 20 | CATANDUVA        | 35005    | Catanduva (SP)      | 0                    | 33                  | 10464174            | 184795 /             |
| 21 | PIRACICABA       | 35030    | Piracicaba (SP)     | 0                    | 0                   | 10344370            | 150114 /             |

Mostrar todas as feições

Fonte: o autor

A simbologia adotada seguiu o mesmo princípio para todos os mapas, dividindo a produção entre 8 a 30 parcelas de valores iguais em divisão suave, sistema de legenda graduada, com variação linear de tonalidade de cores condizentes com os princípios de comunicação visual da cartografia temática, conforme pode ser observado na Figura 19:

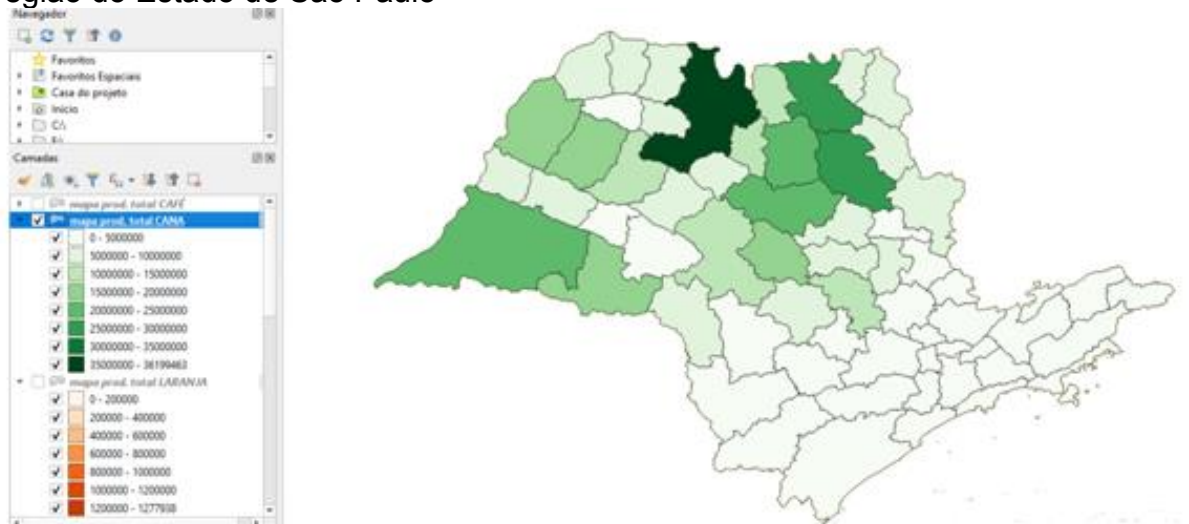
Figura 19– Modelo do sistema de legenda do mapa no software QGIS



Fonte: o autor

A Figura 20 demonstra como funciona o acesso à camada de dados diretamente pelo aplicativo QGIS, como exemplo de um mapa temático que representa o volume total de cana de açúcar produzido por microrregião do Estado de São Paulo. Ao acessar a camada cartográfica, o aplicativo automaticamente reproduz a compartimentação de cores, com os 8 a 30 níveis de produção, que servirá para a legenda do mapa final.

Figura 20 - Projeto do mapa temático “Volume de produção de cana de açúcar por microrregião do Estado de São Paulo”



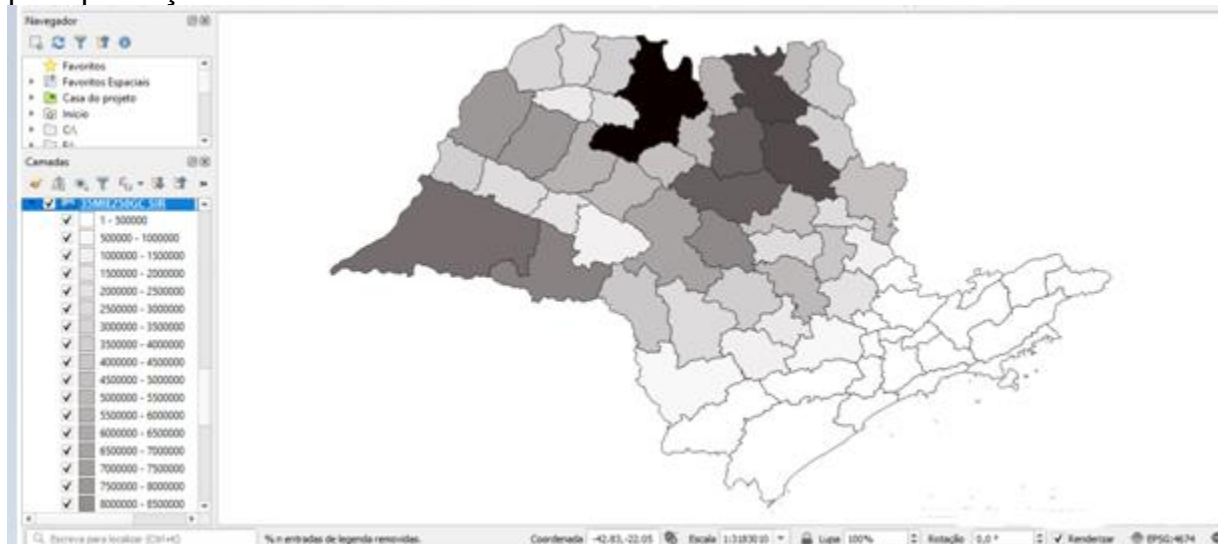
Fonte: o autor

O mapa final de todos esses dados é o mapa “Resíduos Totais de Produção” indicado na Figura 21. Esse mapa apresenta a somatória de todos os resíduos não aproveitados de todas as categorias dos produtos pesquisados, levando em conta

as variáveis de cada produto, já descontado os resíduos que possuem outros empregos e as variáveis regionais (através do co-fator local). Esse mapa pode ser entendido como o mapa principal do projeto por indicar, em cada microrregião do Estado, qual o volume de biomassa disponível à partir das atividades agroindustriais, passíveis de conversão em matéria prima para a produção de biocarvão. Por esse mapa, o empreendedor ou pesquisador na área de biocarvão terá uma noção mais clara de quais regiões do Estado em que há disponibilidade mais significativa de matérias orgânicas diversas, que não estão seguindo para um descarte adequado e que são, portanto, mais significativas para projetos dessa natureza.

É importante ressaltar que esse mapa não apresenta ainda um resultado condizente com a realidade, uma vez que pesquisas sobre porcentagens de material residual disponível e cofatores regionais de variáveis de resíduos necessitam de estudos mais aprofundados para alimentar a base de dados do projeto.

Figura 21 – projeto de mapa sobre “Resíduos totais de agroindústria disponíveis para produção de biocarvão no Estado de São Paulo”.



Fonte: o autor

### 5.3. Estimativa de resíduos agroindustriais disponíveis para a geração de biocarvão

Essa estimativa é apenas para efeito ilustrativo de como pode ser estabelecida, com base no levantamento bibliográfico preliminar. Uma vez que cada produto necessita de levantamentos muito mais aprofundados e atualizados, acompanhado de entrevistas com produtores rurais e pesquisas de campo, esses

dados não podem ser considerados, até o momento, como efetivamente aplicáveis, sendo apenas norteadores de projetos posteriores.

As estimativas de valores aqui apresentadas foram definidas com base nos valores dos referenciais bibliográficos, em observações de campo e contato não sistematizado com produtores rurais e engenheiros agrônomos. A formulação de questionário padrão para ser aplicado entre produtores de uma região é uma alternativa a ser considerada em estudos futuros.

Boa parte das biomassas estudadas encontra emprego como adubo orgânico em logística reversa, como é o caso das camas de esterco. Os estudos bibliográficos levantados apontam que a conversão média de 30% dessas matérias orgânicas em biocarvão e incorporada ao adubo é uma taxa adequada de aproveitamento.

Resíduos orgânicos que já encontram um uso consolidado como biomassa combustível têm potencial para serem aproveitados de modo semelhante em pirólise para produzir biocarvão. Como o rendimento térmico da pirólise é inferior ao da queima total dessa biomassa, há dúvidas se essa conversão pode ser interessante às geradoras de energia. Adotou-se um índice arbitrário de 50% de possibilidade de conversão desse material em biocarvão.

A disponibilização das informações da planilha e do mapa em ambiente aberto, através da WEB, permitirá que mais pesquisadores possam contribuir com dados técnicos e informações que visem afinar esses indicativos, aproximando-os da realidade. Da mesma forma, essas contribuições visam adequar os valores de cofator regional, de modo que o sistema de dados se torne cada vez mais aplicável às suas finalidades.

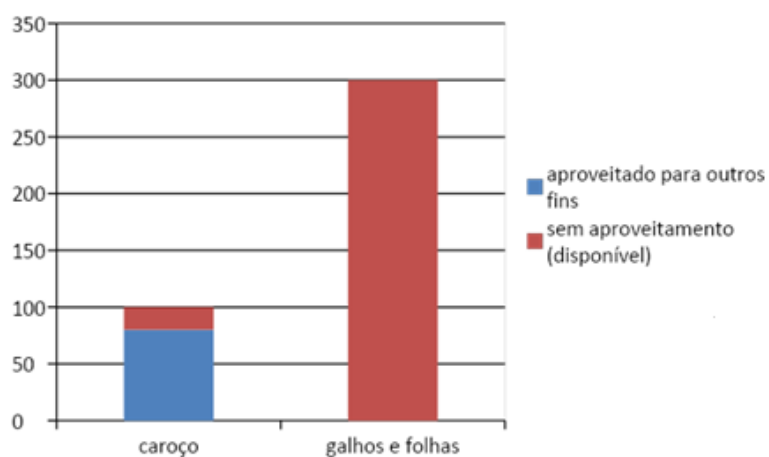
### **5.3.1. Algodão**

Dos produtos levantados, foi o que apresentou maior percentual de resíduos, conforme dados da Tabela 3 e Figura 22, uma vez que folhas e galhos não podem ser reincorporados ao solo como cama orgânica por demorarem a se decompor e servir de atrativo e abrigo às pragas de lavoura (COATES, 2000). O volume dos resíduos de galhos e folhas da produção de algodão chega a ser três vezes maior do que o material colhido (PRIMAZ, 2018)

Tabela 3 - Cálculo da taxa de resíduos potenciais do algodão para conversão em biocarvão = 320%

| Resíduos gerados       | Proporção de massa em relação à matéria prima | de Aplicação                                                                                     | Porcentagem restante |
|------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| <b>Galhos e folhas</b> | 300%                                          | Aterramento ao solo não aconselhável                                                             | 300%                 |
| <b>Caroço</b>          | 100%                                          | Quase todo já utilizado em briquetagem ou óleo. Cerca de 20% de sobra da prensagem sem aplicação | 20%                  |
| TOTAL 320%             |                                               |                                                                                                  |                      |

Figura 22 - Resíduos disponíveis do cultivo do algodão (porcentagem em relação à produção total).



### 5.3.2. Cana de açúcar

Os dados da cana são os que apresentam maior imprecisão, pois é crescente o desenvolvimento de novas tecnologias biogenéticas que aumentam sua produtividade, não havendo referencial bibliográfico suficiente que abarque essas transformações bem mais recentes.

Segundo referencial do texto, 29 % das usinas recebem dos canaviais 3,5 % de impurezas vegetais (nível considerado ótimo), 48 % das usinas recebem a cada tonelada de cana entre 35 a 65 kg de impurezas vegetais e 23 % das usinas ainda recebem 65 kg de impurezas vegetais por tonelada de cana. (DINARDO-MIRANDA; VASCONCELOS; LANDELL, 2008) ou seja:

$$(29\% \times 3,5\% + 48\% \times 5\% + 23\% \times 6,5\%) = 5,9\%$$

Do bagaço, cerca de 30% da massa dessa matéria-prima era destinada a alimentação de ruminantes. Em 2001, com a crise de energia elétrica, o bagaço passou a ser combustível escasso, de valor econômico significativo, tornando-se matéria prima para usinas termelétricas movidas à biomassa.

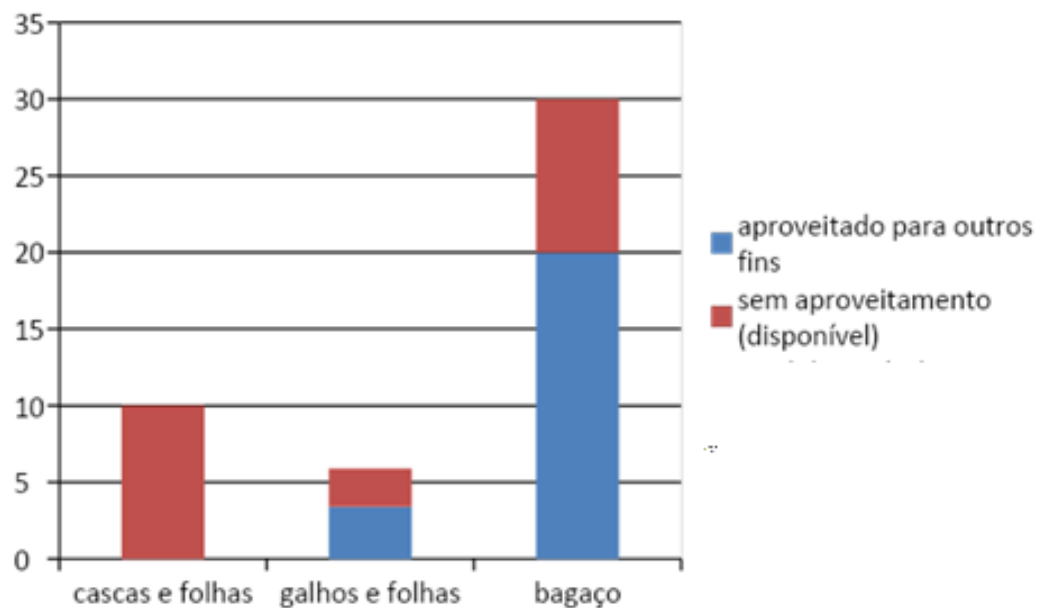
A torta de filtro de usina corresponde de 1% a 4% da massa da cana moída, usada como alimentação do gado e também como fertilizante e composto orgânico no canavial (CARVALHO, 1992).

Aproximadamente cada litro de álcool produzido resulta em 13 litros de vinhaça, ou 800 litros de vinhaça por tonelada de cana. Em geral, quase toda vinhaça retorna ao canavial, visando a recomposição de nutrientes ao solo, embora essa prática sofra críticas por conta de alguns impactos que gera (CARVALHO, 1992). A distribuição dos resíduos de cana de açúcar pode ser melhor compreendida pela visualização da Tabela 4 e Figura 23.

Tabela 4 - Cálculo da taxa de resíduos potenciais da cana de açúcar para conversão em biocarvão = 22,5%

| <b>Resíduos gerados</b>      | <b>Proporção de massa em relação à matéria prima</b> | <b>de Aplicação</b>                                                                                       | <b>Porcentagem restante</b> |
|------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| <b>Cascas e folhas</b>       | 10%                                                  | Biomassa combustível. Pode ser integralmente convertido em biocarvão                                      | 10%                         |
| <b>Impurezas da colheita</b> | 5,9%                                                 | Biomassa combustível. Parte pode ser convertida em biocarvão durante a geração de energia.                | 2,5 %                       |
| <b>Bagaço da cana</b>        | 30%                                                  | Ração animal e biomassa combustível. Parte pode ser convertida em biocarvão durante a geração de energia. | 10%                         |
| <b>Vinhoto</b>               | 1300%                                                | Quase totalmente retorna ao solo em estado líquido                                                        | 0 %                         |
| <b>TOTAL</b>                 |                                                      |                                                                                                           | <b>22,5%</b>                |

Figura 23 – Resíduos disponíveis do cultivo da cana de açúcar (porcentagem em relação à produção total).



### 5.3.3. Grãos: arroz

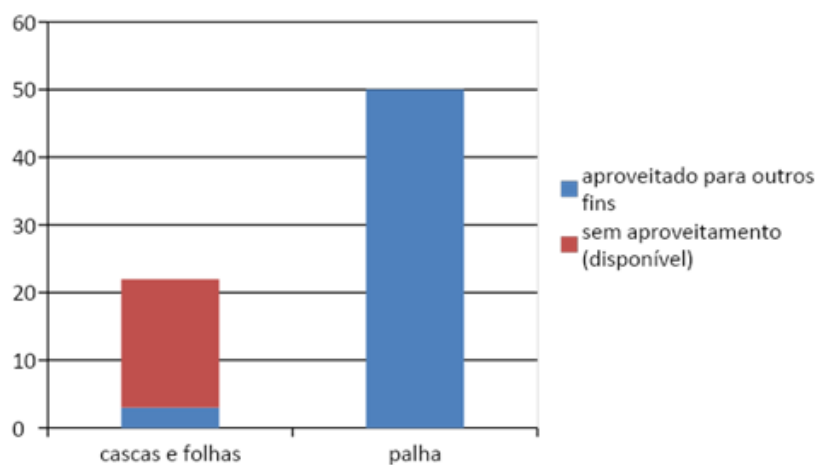
Com alta geração de resíduo, os principais problemas da casca de arroz são as limitações para uso como ração alimentar e o baixa massa que encarece a logística (CARVALHO, 1992). Os dados sobre uso da palha (reincorporado ao plantio, biomassa energética ou cama de esterco) são inconclusivos, por isso foram desconsiderados.

Conforme indicações da Tabela 5 e da Figura 24, a casca de arroz corresponde a 22% da massa do grão com casca, sendo 15% desse resíduo utilizado como fonte energética durante o seu processo de secagem (IBP, 2020).

Tabela 5 - Cálculo da taxa de resíduos potenciais do arroz para conversão em biocarvão = 19%

| Resíduos Gerados | Proporção de massa em relação à matéria prima | de Aplicação                                                                                             | Porcentagem restante                    |
|------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Casca            | 22%                                           | 15% utilizado como biomassa energética na própria usina de processamento. 85% não têm qualquer aplicação | 19% (85% dos 22% de proporção da massa) |
| Palha            | Não definido                                  | Quase totalmente reaplicada no campo de cultivo                                                          |                                         |
| TOTAL 19%        |                                               |                                                                                                          |                                         |

Figura 24 - Resíduos disponíveis do cultivo de arroz (porcentagem em relação à produção total).



#### 5.3.4. Grãos: café

Constituído de resíduo pouco complexo, a casca externa e o pergaminho enfrentam problema semelhante ao da casca de arroz. Trata-se de resíduo leve, que ocupa muito espaço, encarecendo a logística ou obrigando a peletização na própria área de torrefação. Cada tonelada de café colhido resulta em 1,25 toneladas de resíduo, principalmente o pergaminho e casca externa (FARIA, 2016) cujas destinações podem ser visualizadas na Tabela 6 e na Figura 25.

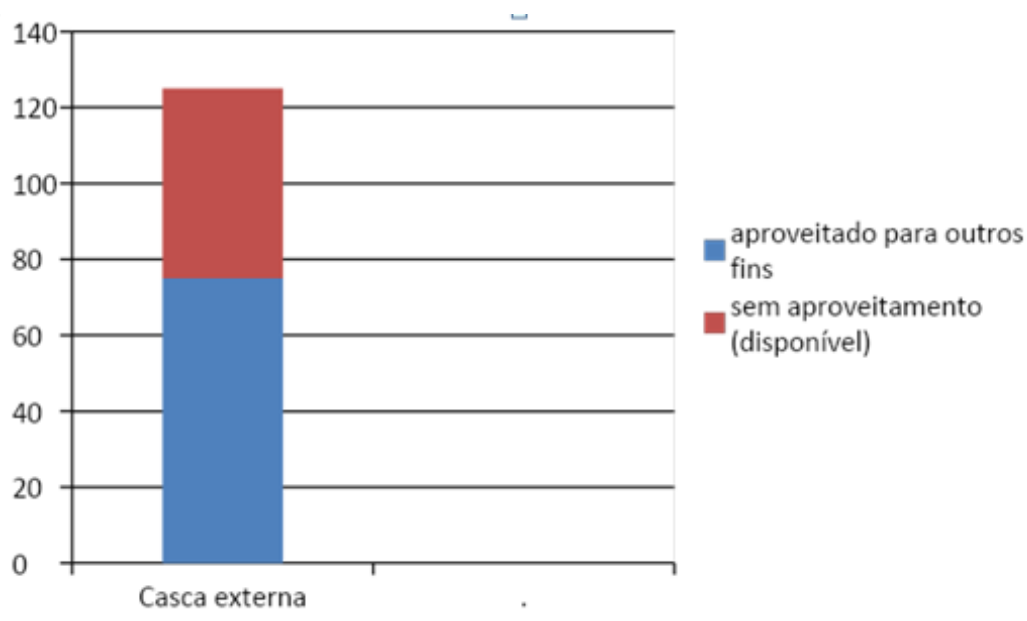
Mais da metade desses resíduos é peletizada e convertida em ração (CARVALHO, 1992), (FARIA, 2016).

Estudos de Espinoza, (2015) e Primaz, (2018) indicam boa viabilidade para conversão desses resíduos em biocarvão para condicionadores de solo e catalisador de corantes em águas efluentes na indústria têxtil.

Tabela 6 - Cálculo da taxa de resíduos potenciais do café para conversão em biocarvão = 50%

| <b>Resíduos gerados</b>           | <b>Proporção de massa em relação à matéria prima</b> | <b>Aplicação</b>                                     | <b>Porcentagem restante</b> |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------|
| <b>Pergaminho / casca externa</b> | 125%                                                 | Aprox. 60% destinada a pelitização para ração animal | 50%<br>(40% de 125%)        |
|                                   |                                                      |                                                      | <b>TOTAL 50%</b>            |

Figura 25– Resíduos disponíveis do cultivo de café (porcentagem em relação à produção total)



### 5.3.5. Grãos: milho, feijão e soja

Nas concepções modernas do cultivo de milho, soja e feijão, praticamente todo resíduo gerado pode ser aproveitado diretamente no campo, seja na conversão da casca de milho em cama de esterco, das cascas de leguminosas em ração animal, ou no retorno da matéria orgânica das plantas diretamente para o solo, na técnica de plantio direto. (KONZEN, 2020) (IBP, 2020). Diferente do que ocorre com o cultivo de algodão ou a extração madeireira, a reintrodução da matéria orgânica dessas plantas no solo traz mais benefícios do que problemas.

Entretanto, nas observações de campo assim como no relato de administradores rurais, nem sempre o plantio direto é feito, seja por desconhecimento da técnica, seja por opção do produtor em outros sistemas. Além disso, diversas pequenas propriedades pelo interior do Estado desenvolvem cultivos de grãos sem um sistema articulado de fornecimento das cascas para o setor pecuarista intensivo. Assim, há um passivo de resíduos muito difícil de ser estimado, frente às particularidades regionais, mas que não pode ser desprezado.

Considerar-se-á, para efeito de constatação desses produtos, a carga de 1% de resíduos não aproveitados para a produção de milho, de soja e de feijão.

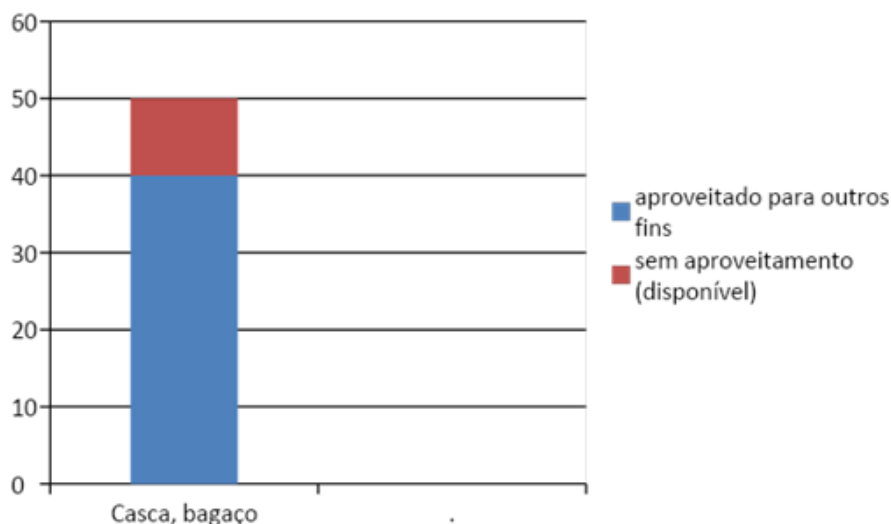
### 5.3.6. Laranja

A estimativa de resíduos da produção de laranja juntamente com a cana é a que mais sofre variações regionais bastante expressivas. Primeiramente por causa do destino, se voltada para a indústria de suco ou para consumo *in-natura*. Na Tabela 7 e na Figura 26 exibem-se as destinações de resíduos da laranja para o processamento de suco. O bagaço fresco das frutas pode ser destinado para alimentação de gado se estiver próximo de área pecuarista, caso contrário, somente após peletização (CARVALHO, 1992). Há registro de volumes consideráveis de bagaço de laranja após prensagem industrial que chega aos aterros sanitários do interior de SP, mas esses volumes sofrem variações sazonais imprevisíveis em função da própria flutuação internacional da exportação de suco de laranja (ALEXANDRINO, 2007).

Tabela 7 - Cálculo da taxa de resíduos potenciais da laranja para conversão em biocarvão =10%

| Resíduos gerados | Proporção da massa em relação à matéria prima | Aplicação                                                                                                                          | Porcentagem restante |
|------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Bagaço           | 50% da massa da fruta úmida                   | Alimentação animal, peletização, produção de pectina para a indústria alimentícia. Aprox. 20% é descartado sem qualquer aplicação. | 10%<br>(20% de 50%)  |
|                  |                                               |                                                                                                                                    | TOTAL 10%            |

Figura 26 – Resíduos disponíveis do processamento da laranja para suco (porcentagem em relação à produção total).



### 5.3.7. Pecuária: granjas de galináceos e suínos.

Como os dejetos de abate são demasiadamente complexos para serem analisados, não foram considerados dentro desse cálculo.

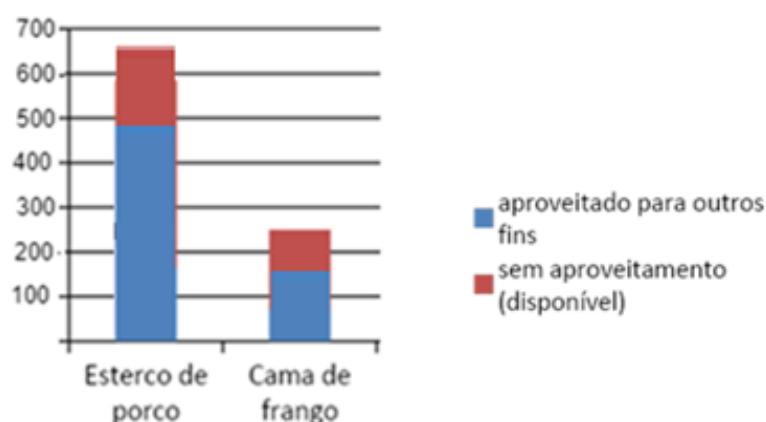
Segundo o referencial bibliográfico, cada ave produz em médio, até chegar à idade de abate um total de 2,5 Kg de fezes (JUNIOR, 2011), enquanto um porco produz aproximadamente 600 Kg (OLIVEIRA; HIGARASHI, 2006). Sob sistema de compostagem é bastante difundido seu uso para fertilização dos solos (AVICULTURA INDUSTRIAL, 2019). Na Tabela 8 e na Figura 27 pode-se visualizar e comparar as quantidades de resíduos provenientes de granjas de cama de frango e de esterco de porco e suas taxas de aproveitamento. Os materiais misturados na cama de esterco (palha, capim etc) não entram no cálculo, por que já foram estimados sobre os demais produtos.

Tabela 8 - Cálculo da taxa de resíduos potenciais para conversão em biocarvão, Galináceo 700g p/ animal e Suíno – 180Kg por animal.

| <b>Resíduos Gerados</b> | <b>Proporção de massa em relação à matéria prima</b> | <b>Aplicação</b>                                                                                       | <b>Porcentagem restante</b> |
|-------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| <b>Cama de frango</b>   | 2,35 Kg por animal                                   | Adubação orgânica. Consideram-se de que pelo menos 30% do resíduo possam ser convertidos em biocarvão. | 700 g por animal            |
| <b>Esterco de porco</b> | 600 kg por animal                                    | Adubação orgânica. Consideram-se de que pelo menos 30% do resíduo possam ser convertidos em biocarvão  | 180 Kg por animal           |
|                         |                                                      |                                                                                                        | <b>TOTAL</b>                |
|                         |                                                      |                                                                                                        | Galináceo – 700 g p/ anim.  |
|                         |                                                      |                                                                                                        | Suíno - 180 Kg p/ anim      |

Figura 27 - Resíduos disponíveis de granjas

(esterco de porco em Kg por animal; cama de frango em Kg por 100 animais)



### 5.3.8. Pinus e eucalipto

Esses resíduos sofrem um ciclo bastante longo, entre 7 a 12 anos, pela própria dinâmica da silvicultura. Conforme levantamento bibliográfico, há controvérsias sobre manter ou não os resíduos de galhos e folhas no solo, uma vez que eles ajudam a recompor a matéria orgânica e conter a lixiviação, mas favorecem o surgimento de pragas (TOMAZ, 2017). Recomenda-se que metade desse material seja deixado no solo e a outra parcela busca-se uma aplicação que não seja a queima no local (SCHUMACHER, 2003). Para cada quilo de árvore (tanto o pinus como o eucalipto) convertido em tora comercial, há um correspondente aproximado de 20% de folhas e galhos de resíduo (TOMAZ, 2017).

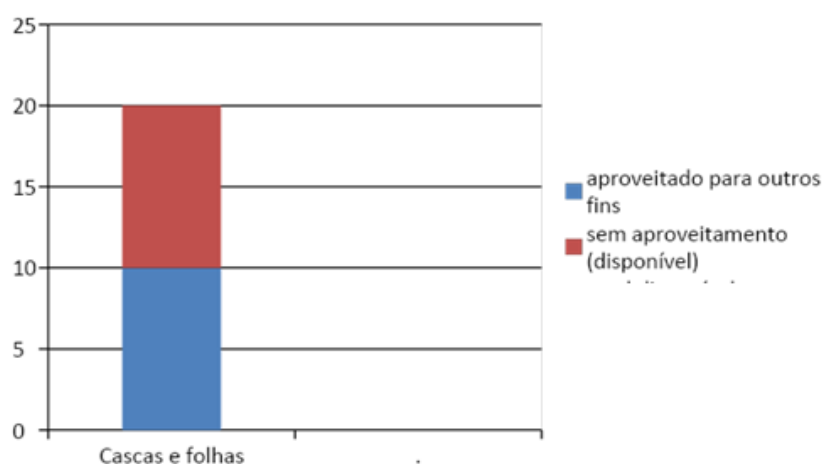
Como muitas serrarias estão afastadas das áreas de extração das toras e é crescente o interesse dessas serrarias em reverter os resíduos para biomassa energética ou indústria de painéis, esse resíduo não foi contabilizado, embora não deixe de ser um material de interesse de estudo posterior (ALTENHOFEN, 2018). A destinação dos resíduos de silvicultura pode ser comparada a partir dos dados da Tabela 9 e da Figura 28.

Os finos de carvão que sobram de alto-forno das usinas termelétricas são também uma categoria de biocarvão que pode ser melhor analisada em estudos posteriores.

Tabela 9 - Cálculo da taxa de resíduos potenciais da para conversão de madeira em biocarvão = 10%

| Resíduos gerados                        | Proporção da massa em relação à matéria prima | Aplicação                                                               | Porcentagem restante                                       |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| <b>Galhos e folhas durante extração</b> | 20% em relação a massa da tora comercializada | 50% pode ser convertido forração de solo. 50% não tem aplicação prática | 10% em relação à massa da tora comercializada (50% de 20%) |
|                                         |                                               |                                                                         | <b>TOTAL 10%</b>                                           |

Figura 28 – Resíduos disponíveis da silvicultura (pinus e eucalipto / porcentagem em relação à produção total)



O cálculo para conversão de resíduos de madeira seguiu metodologia diferenciada por conta da diferença de unidades de medida. No sistema PEVS/SIDRA do IBGE de onde foram obtidos os dados totais, os valores finais de pinus e eucalipto já convertidos em carvão vegetal constam em toneladas, enquanto os valores de pinus e eucalipto para conversão em papel, celulose e outros fins,

constam em metros cúbicos. As referências para conversão de medidas da madeira, segundo dados do site B2Wood, são indicados na Tabela 10:

Tabela 10 - Proporção entre volume e massa da madeira

|                     | <b>ESTÉREO (ST)</b> | <b>CÚBICO (m<sup>3</sup>)</b> | <b>TONELADAS</b> |
|---------------------|---------------------|-------------------------------|------------------|
| PINUS COM CASCA     | 1                   | 0,70                          | 0,588            |
|                     | 1,43                | 1                             | 0,828            |
|                     | 1,73                | 1,20                          | 100              |
| PINUS SEM CASCA     | 1                   | 0,57                          | 0,545            |
|                     | 1,75                | 1                             | 0,956            |
|                     | 1,83                | 1,04                          | 1                |
| EUCALIPTO COM CASCA | 1                   | 0,7                           | 0,608            |
|                     | 1,43                | 1                             | 0,868            |
|                     | 1,63                | 1,15                          | 1                |
| EUCALIPTO SEM CASCA | 1                   | 0,61                          | 0,577            |
|                     | 1,64                | 1                             | 0,946            |
|                     | 1,74                | 1,06                          | 1                |

Fonte: (adaptado) <https://www.b2wood.com>

Como os dados fonte do IBGE são da tora já descascada e sem uma referência do estéreo desses dados, utilizou-se a referência média de dados Estéreo 1,75 do pinus sem casca, onde um metro cúbico equivale a 0,956 tonelada e Estéreo 1,64 para Eucalipto sem casca, onde 1 metro cúbico equivale a 0,946 tonelada. Com isso, foi estabelecida a estimativa aproximada de toneladas de madeira produzida em cada micro-região já beneficiada.

#### **5.4. Mapeamento dos potenciais de solo para projetos de biocarvão**

O levantamento bibliográfico evidencia que praticamente qualquer classe de solo pode ter suas propriedades físico-químicas melhoradas com a aplicação em níveis adequados de biocarvão. Entretanto, alguns solos tendem a ter resultados mais expressivos de melhoria das suas propriedades produtivas, enquanto em outros, essa otimização tende a insignificância.

A maior parte dos estudos com biocarvão levantados na pesquisa apontam que, em diferentes amplitudes (que dependem da matéria prima fonte e do processo de pirólise empregado) os benefícios mais registrados foram: disponibilização de carbono para as raízes de modo contínuo e longo prazo (MADARI, 2006); correção de pH, principalmente em solos ácidos, com melhora da capacidade de troca catiônica; melhora da atividade microbiológica do solo, ao disponibilizar sítios na porosidade das partículas o que indiretamente acelera o ciclo do nitrogênio para as plantas (LEHMANN, 2007) (CARVALHO *et al.*, 2014); regularização hídrica, principalmente em solos arenosos, mas também em solos muito argilosos, onde o biocarvão tende a aproximá-los de uma textura mais equilibrada.

Algumas categorias de biocarvão também contribuem na retenção de elementos metálicos junto à superfície, tanto por fisissorção quanto por quimissorção, diminuindo sua lixiviação, de modo que esses elementos permanecem mais disponíveis para a absorção pelas raízes ao invés de se combinarem em reações de oxidação que tendem a ser deletérias para a produtividade agrícola (PETTER *et al.*, 2016).

Dessa análise pode-se deduzir que solos arenosos, pobres em matéria orgânica, com altos teores naturais de oxidação e com propriedades negativas à

atividade microbiológica, são aqueles que mais tendem a evoluir sua produtividade quando são alimentados com partículas de biocarvão (CUNHA *et al.*, 2009) .

Numa direção oposta, há solos com condições naturais tão favoráveis às diferentes práticas de cultivo, que a adição de biocarvão só é necessária no intuito de preservar as propriedades inatas do ambiente ao longo de inúmeras safras. Esse grupo pode agregar solos com gênese absolutamente distintas, como solos eluvionais vulcânicos (terra roxa, tchernozions), solos aluvionais diversos de fundos de vale até solos híbridos calcário-gnaissicos, como o Massapê do litoral nordestino.

Em solos com alto teor de matéria orgânica decomposta, como nos solos húmicos e nos organossolos, o biocarvão pouco tem a acrescentar como insumo, uma vez que as partículas orgânicas desse solo tendem, em geral, a exercer funcionalidades muito próximas daquelas que o biocarvão pode agregar. Em algumas situações ele pode servir como equilibrante de pH de longo prazo, mas a maioria dos produtores já consolidou a prática de uso do calcário para esse fim.

Por outro lado, há os solos que, independente de suas qualidades, estão situados em ambientes geomorfológicos onde a agricultura é inviável ou desaconselhável. Isso inclui solos em ambientes costeiros com alta salinização subterrânea pelo avanço das águas marinhas ao lençol freático, solos em zonas de alta declividade, com tendência a deslizamentos ou solos com teor muito alto de fragmentos rochosos e matacões que impossibilitam o trabalho com maquinário. Nessas áreas, o biocarvão pode ser uma ferramenta de descontaminação ambiental ou de facilitador do reflorestamento, mas, incoerente como insumo agrícola (IAC, 2015) (LEPSH, 2010) (EMBRAPA, 2001).

Desse modo, concebe-se que solos formados a partir de processos pedogênicos muito distintos podem ter propriedades físico-químicas assemelhadas, o que permite estabelecer alguns agrupamentos quanto ao seu comportamento diante da injeção de alguns insumos.

Esse raciocínio de agrupamentos é que permite transformar mapas de solos extremamente complexos e de difícil leitura em um mapa com menor número de variáveis, por exemplo: ótimo, bom, indiferente ou impróprio à injeção do insumo.

Diante dessa análise, construiu-se o Quadro 3 com as categorias mais relevantes dos solos do Estado, seja pelo tamanho de sua área de ocorrência, seja por já estar historicamente muito associado a determinadas práticas de uso (agrícola ou não).

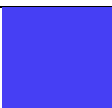
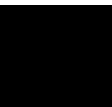
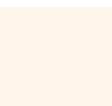
No programa QGIS o desenvolvedor do projeto tem a possibilidade de escolher as cores que simbolizam as particularidades de cada polígono através da função categorização, de modo a produzir novos mapas temáticos. Com isso, basta atribuir a mesma cor de legenda para solos diferentes, mas que possuem comportamento assemelhado frente ao biocarvão. Embora a função categorização seja aplicável a mapas temáticos Qualitativos, a comunicação visual mais adequada escolhida para a legenda é a temática Ordenativa, intuitivamente mais compreensível, compondo um degradê do roxo intenso ao verde bandeira, demonstrado no Quadro 4.

Quadro 3 - Potencialidades do biocarvão em diferentes categorias de solos

| POTENCIALIDADES DO BIOCARVÃO                                                                                                                                 | PROPRIEDADES DOS SOLOS                                                                                                                                                                                          | TIPOS DE SOLOS                                                                                                                                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Alto potencial de aplicação do biocarvão como insumo de propriedades físico químicas                                                                         | <b>Alto potencial 1</b><br><br>Solos com textura granulométrica média a arenosa, deficiência de nutrientes média a alta, pH ácido com baixa troca catiônica.                                                    | - Latossolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos de textura média                                                                                                                                         |
|                                                                                                                                                              | <b>Alto potencial 2</b><br><br>Solos com textura média arenosa, baixa retenção de água em camada superficial e deficiência de nutrientes minerais. Potencialidade agrícola quando aplicadas medidas corretivas. | - Argissolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos de textura arenosa/média<br><br>- Neossolos Quartzarênicos                                                                                               |
| Uso do biocarvão como caráter preventivo e de manutenção das propriedades naturais ou para conservação de microporos para sítios de atividade microbiológica | <b>Médio potencial 1</b><br><br>Solos com boas potencialidades naturais para atividade agrícola                                                                                                                 | - Argissolos de textura média/argilosa e argilosa<br><br>- Latossolos Vermelhos de textura argilosa ou muito argilosa<br><br>- Latossolos Vermelho-Amarelos de Textura argilosa<br><br>- Nitossolos |
|                                                                                                                                                              | <b>Médio potencial 2</b><br><br>Solos com média a boa fertilidade mineral. Textura média-argilosa com problema de coesão, relevo acidentado e efeito erosivo. Indicado a culturas perenes e/ou silvicultura.    | - Cambissolos                                                                                                                                                                                       |
| Aplicação do Biocarvão apenas recomendável em projetos de recomposição da flora nativa                                                                       | <b>Baixo potencial</b><br><br>Zonas impróprias para atividades agrícolas por condições geomorfológicas desfavoráveis.                                                                                           | Espodossolos<br><br>Gleissolos Tiomórficos<br><br>Neossolos Litólicos                                                                                                                               |
| Baixa aplicabilidade do Biocarvão como insumo agrícola.                                                                                                      | <b>Desnecessário 1</b><br><br>Solos com saturação hídrica, fertilidade natural variável, alto teor de matéria orgânica.                                                                                         | Gleissolos                                                                                                                                                                                          |
|                                                                                                                                                              | <b>Desnecessário 2</b><br><br>Solos com saturação hídrica, fertilidade natural variável, alto teor de matéria orgânica. Possível aplicação como corretor de pH de longo prazo                                   | Organossolos                                                                                                                                                                                        |

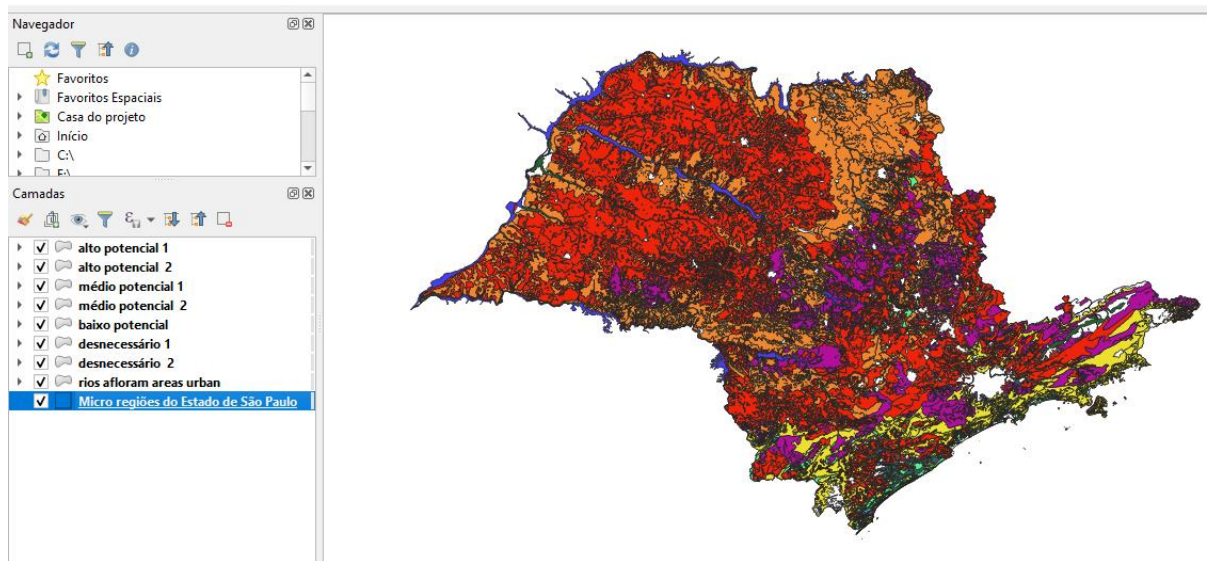
Fonte: o autor

Quadro 4 -Sistema de legendas do mapa de potenciais do biocarvão

| Potencial do biocarvão em diferentes categorias de solo | Cor da legenda no mapa                                                              | Classes de solo                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Alto potencial 1</b>                                 |    | - Latossolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos de textura média                                                                                                                             |
| <b>Alto potencial 2</b>                                 |    | - Argissolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos de textura arenosa/média<br>- Neossolos Quartzarênicos                                                                                       |
| <b>Médio potencial 1</b>                                |    | - Argissolos de textura média/argilosa e argilosa<br>- Latossolos Vermelhos de textura argilosa ou muito argilosa<br>- Latossolos Vermelho-Amarelos de Textura argilosa<br>- Nitossolos |
| <b>Médio potencial 2</b>                                |   | - Cambissolos                                                                                                                                                                           |
| <b>Baixo potencial</b>                                  |  | - Espodossolos<br>- Gleissolos Tiomórficos<br>- Neossolos Litólicos                                                                                                                     |
| <b>Desnecessário 1</b>                                  |  | - Gleissolos                                                                                                                                                                            |
| <b>Desnecessário 2</b>                                  |  | - Organossolo                                                                                                                                                                           |
| <b>Rios, corpos d'água</b>                              |  |                                                                                                                                                                                         |
| <b>Afloramentos rochoso</b>                             |  |                                                                                                                                                                                         |
| <b>Áreas urbanas</b>                                    |  |                                                                                                                                                                                         |

As classes de solo de expressividade territorial muito pequena (que ao todo ocupam menos de 2% da área do Estado) não foram classificadas ainda. O mapa, com todas as camadas selecionadas juntas, tem o aspecto da Figura 29:

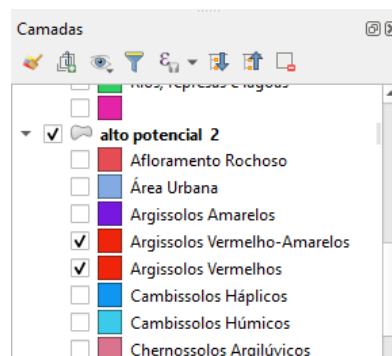
Figura 29- Projeto do mapa para análise de potencialidades do biocarvão em diferentes classes de solo.



Fonte: o autor

Para que o usuário do projeto consiga, em um único clique, acessar cada categoria de solo e visualizar exatamente onde eles ocorrem sobre o mapa, optou-se por se criar uma camada para cada padrão de comportamento que se abre em atributos da camada relacionais a cada classe de solo, conforme demonstrado na Figura 30:

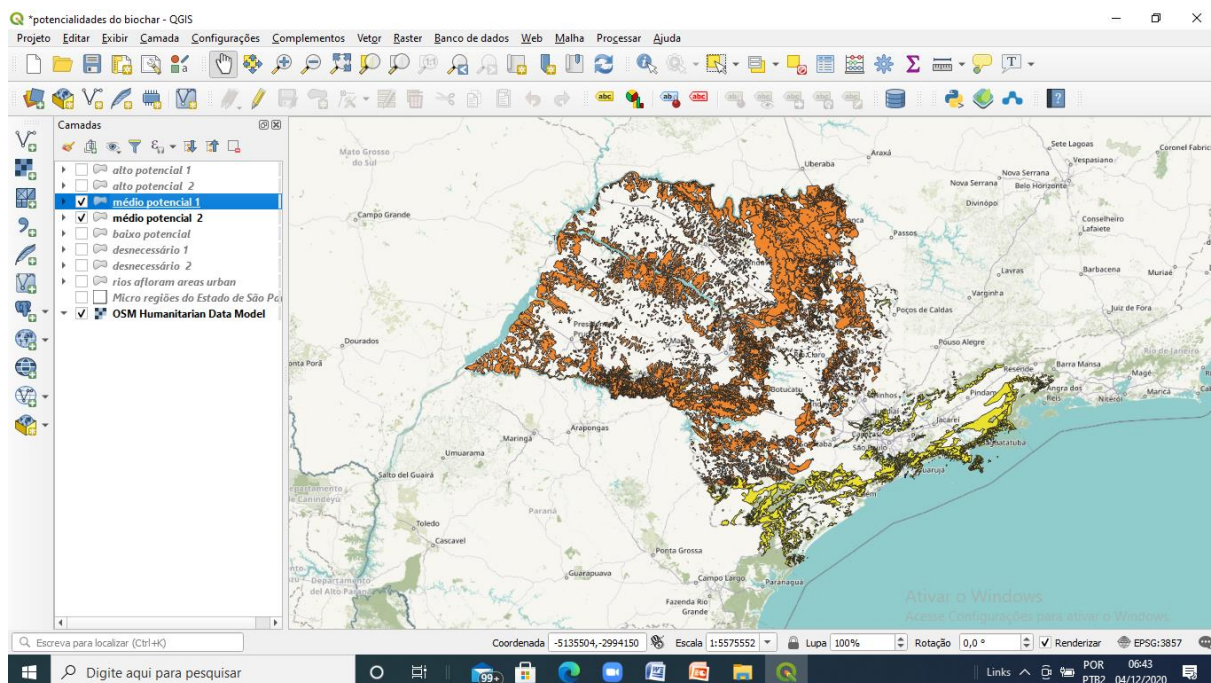
Figura 30 - Legendas de adequação do biocarvão em diferentes categorias de solo



Fonte: o autor

Ao dividir as Potencialidades de Aplicação do Biocarvão em camadas, o usuário tem a possibilidade de selecionar uma camada específica de potencialidade de aplicação do biocarvão e visualizá-la sobre o mapa de microrregiões do Estado de São Paulo conforme demonstrado na Figura 31:

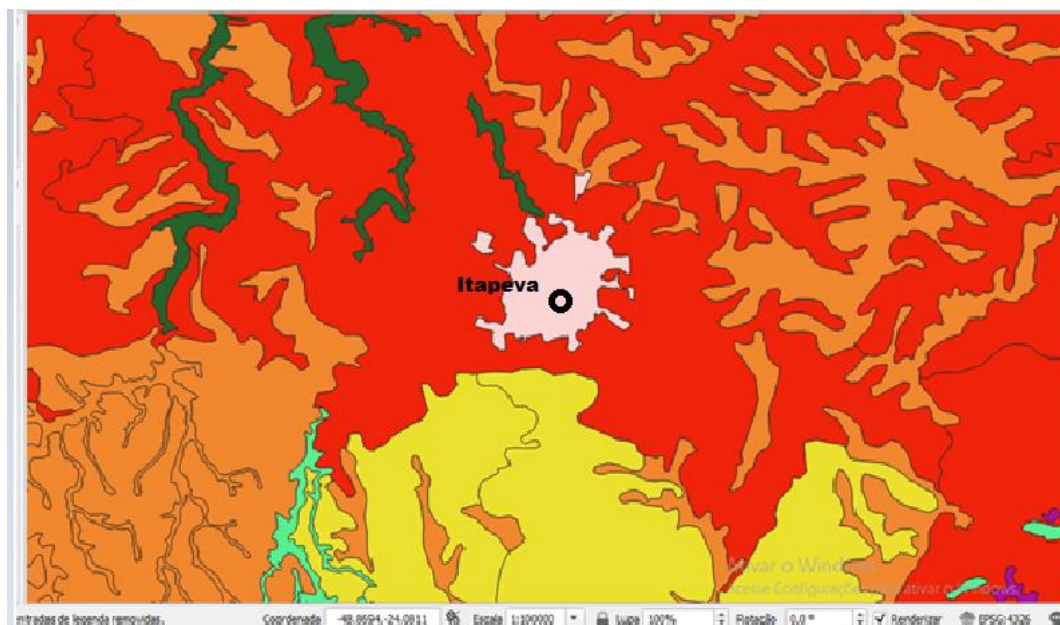
Figura 31– Áreas consideradas como médio potencial 1 e médio potencial 2 para aplicação do biocarvão.



Fonte: o autor

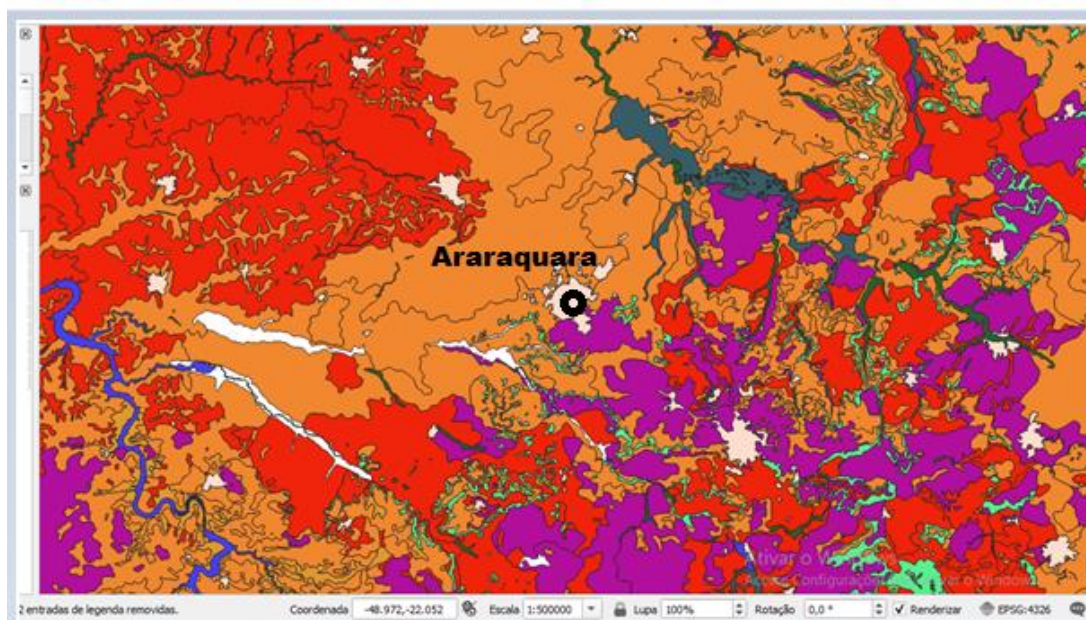
Como os mapas de base para a produção do mapa vetorial de solos contém dados em escala suficientemente grande para o fenômeno representado e os vetores estão todos georreferenciados, o usuário consegue digitar as coordenadas geográficas de uma localidade em específico e visualizar em diferentes escalas os potenciais de uso do biocarvão do entorno. Na Figura 32 há uma visualização do entorno no município de Itapeva, nas coordenadas Latitude: -23.9676 Longitude: -48.901 e escala 1:100.000 enquanto na Figura 33 está representado o entorno de Araraquara, nas coordenadas Latitude: -21.7946, Longitude: -48.1766 21° (valores já convertidos) em escala 1:500.000

Figura 32- Modelo de mapa das potencialidades de aplicação do biocarvão nos arredores de Itapeva na escala 1:100.000



Fonte: o autor

Figura 33- Modelo de mapa das potencialidades de aplicação do biocarvão nos arredores de Araraquara na escala 1:500.000



Fonte: o autor

### 5.5. Mapeamento para aplicação de biocarvão em projetos de remediação dos solos contaminados por metais potencialmente tóxicos.

O levantamento por meio de pesquisa cartográfica priorizou seis informações divididas em camadas dentro do aplicativo do QGIS nesse mapa: área de recarga do Aquífero, aterros sanitários, esgoto, carga de agrotóxicos e fertilizantes, rede hídrica e divisão das microrregiões do Estado.

**Camada 1:** dá a localização da área de recarga do Aquífero Guarani, região onde se deve priorizar a proteção do solo, visando manter a qualidade do reservatório de água subterrâneo. Essa camada foi obtida diretamente a partir do mapa de Unidades Geomorfológicas do Relevo de São Paulo obtido no Sistema DATAGEO, selecionando-se a Depressão Periférica da Borda Leste da Bacia do Paraná, que corresponde a porção arenítica por onde há maior infiltração da água que abastece ao Aquífero Guarani (OLIVEIRA; GUERRA, 2011), sendo indicada no mapa síntese com uma texturização verde-esmeralda e opacidade de 20%, para permitir uma visualização harmonizada com as demais camadas, juntamente com a rede hidrográfica, segundo a seguinte simbologia:



Área prioritária de cuidado com o solo – Recarga do Aquífero Guarani

**Camada 2:** principais problemas com aterros sanitários, foi obtida do sistema DATAGEO o arquivo Shapefile de Índice de Qualidade dos Aterros de Resíduos Sólidos, construído a partir de dados estatísticos de classificação elaborados pela CETESB. Nessa camada foram selecionados apenas os aterros sanitários com IQR abaixo de 7, valor considerado impróprio pelos critérios da CETESB. Esses aterros foram identificados com uma cor única e sólida de legenda:



Aterros com IQR < 7,0

Importante ressaltar que outras zonas de aterros que podem estar classificadas hoje com IQR superior a 7,0 não deixam de ter o passivo dos resíduos que anteriormente eram despejados de modo impróprio, podendo ter ainda índices de contaminação de solo piores do que dos aterros que ainda não foram modernizados, dependendo da extensão e volume acumulado em cada área.

**Camada 3:** apresenta os Indicadores de Coleta e Tratabilidade de Esgoto. Essa camada foi obtida com mapa construído pela CETESB e disponível no DATAGEO – Sistema Ambiental Paulista, selecionando-se apenas os ICTEM - Índices de Controle e Tratamento de Esgoto Municipal inferiores a 2,5, divididos em duas categorias de legenda:



ICTEM 0,6 a 2



ICTEM 2 A 4

**Camada 4:** Demonstra áreas potenciais de contaminação por agrotóxicos e fertilizantes. Elaborada utilizando-se as planilhas de produção agrícola por produto do Sistema SIDRA do IBGE, vinculadas a um fator multiplicador de cada produto relacionado ao nível de intensidade de aplicação de insumos. Conforme levantamento bibliográfico, confirmou-se que tomate, maçã e batata inglesa são as culturas com consumo mais intenso de pesticidas por hectare (USP ESALQ, 2020), enquanto a soja e milho são as que mais utilizam fertilizantes fosfáticos, que tende a acumular elevado teor de Cádmio e Chumbo no solo (SILVA, 2007).

Apoiando-se nos dados do SIDRA - IBGE em planilha de produção anual, identificou-se as áreas com maior produção acumulada de tomate, maçã e batata. Como esse produtos tem massas diferentes, sendo os dados da SIDRA disponibilizados em toneladas de produção, não há como compará-los de modo equilibrado, uma vez que se pretende calcular a intensidade comparativa de cultivo de cada produto, não a quantidade. Para que os dados ficassem dentro de um standard comparativo, a quantidade de produção em toneladas de cada produto em cada região foi convertida em “índice de cultivo” (IC), dividindo o volume local (vol.) pela média aritmética ( $\bar{x}$ ) da produção de todas as regiões.

$$IC = vol \div (\bar{x})$$

Esse procedimento denominado normalização de dados estatísticos (GOMES; GARCIA, 2002) permite comparar, por exemplo, produção de batatas com

produção de tomate, mesmo em se tratando de produtos com massas muito discrepantes (considerando que nesse caso a variável massa não é necessariamente proporcional à quantidade de agrotóxico lançado). A soma dos Índices de Cultivos de tomate, batata e maçã resultou em um novo índice a ser plotado nos mapas, o Índice de Concentração de Pesticidas (ICP). A soma dos Índices de Cultivos de soja e milho, seguindo o mesmo raciocínio, resultando no Índice de Concentração de Fertilizantes Fosfáticos (ICFF). Para esses cálculos foi construída uma planilha de conversão segundo o modelo da Figura 34.

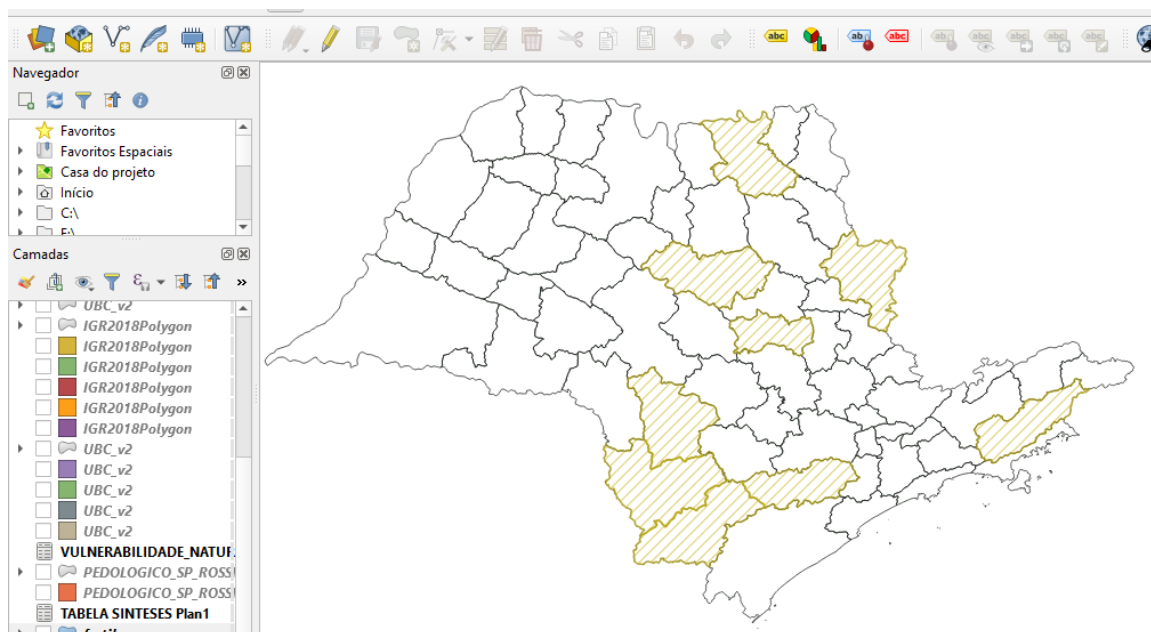
Figura 34– Modelo da planilha para cálculo do IC, ICP e ICFF.

| microregião |                 |       |            |          |           |         |      |           |          |        |   |            |          |            |   |              |
|-------------|-----------------|-------|------------|----------|-----------|---------|------|-----------|----------|--------|---|------------|----------|------------|---|--------------|
|             | A               | B     | C          | D        | E         | F       | G    | H         | I        | J      | K | L          | M        | N          | O | P            |
| 1           | microregião     | Total | Batata-ing | Café (em | Cana-de-a | Laranja | Maçã | Milho (em | Soja (em | Tomate |   | ind Batata | ind Maça | ind Tomate |   | total toxico |
| 2           | Adamant...      |       | 0          | 5542     | 5593785   | 605     | 0    | 19096     | 9217     | 14118  |   | 0          | 0        | 1,021637   |   | 1,021637     |
| 3           | Amparo (S...    |       | 12295      | 11692    | 180470    | 35252   | 0    | 32417     | 3345     | 5556   |   | 1,140998   | 0        | 0,402055   |   | 1,543054     |
| 4           | Andradine...    |       | 0          | 151      | 15335820  | 83921   | 0    | 30678     | 20464    | 7500   |   | 0          | 0        | 0,542731   |   | 0,542731     |
| 5           | Araçatuba...    |       | 0          | -        | 15487566  | 56800   | 0    | 45354     | 45052    | 10056  |   | 0          | 0        | 0,727694   |   | 0,727694     |
| 6           | Araraquar...    |       | 0          | 555      | 22385125  | 841124  | 0    | 58227     | 44756    | 1340   |   | 0          | 0        | 0,096968   |   | 0,096968     |
| 7           | Assis (SP)...   |       | 0          | 389      | 18396561  | 11180   | 9    | 497388    | 574810   | 677    |   | 0          | 0,115408 | 0,048991   |   | 0,164399     |
| 8           | Auriflama...    |       | 0          | 1        | 3916994   | 16636   | 0    | 18974     | 5840     | 75     |   | 0          | 0        | 0,005427   |   | 0,005427     |
| 9           | Avaré (SP)...   | 62350 | 3759       | 3682850  | 1277938   |         | 644  | 280606    | 233061   | 0      |   | 5,786194   | 8,25809  | 0          |   | 14,04428     |
| 10          | Bananal (S...   |       | 0          | -        | 15425     | 640     | 0    | 1998      | 0        | 50     |   | 0          | 0        | 0,003618   |   | 0,003618     |
| 11          | Barretos (...)  |       | 0          | 4        | 10492800  | 594468  | 0    | 18427     | 20280    | 3500   |   | 0          | 0        | 0,253274   |   | 0,253274     |
| 12          | Batatais (S...  |       | 0          | 26162    | 7791820   | 111226  | 0    | 24701     | 16512    | 3132   |   | 0          | 0        | 0,226644   |   | 0,226644     |
| 13          | Bauru (SP)...   |       | 0          | 2877     | 11710784  | 1241017 | 0    | 22287     | 27207    | 1678   |   | 0          | 0        | 0,121427   |   | 0,121427     |
| 14          | Birigui (SP)... |       | 0          | 922      | 11456457  | -       | 0    | 57811     | 86579    | 2777   |   | 0          | 0        | 0,200955   |   | 0,200955     |
| 15          | Botucatu (...)  |       | 6825       | 2705     | 6388090   | 655064  | 0    | 41797     | 12972    | 2028   |   | 0,633372   | 0        | 0,146754   |   | 0,780127     |
| 16          | Bragança f...   |       | 2765       | 1579     | 24230     | 3125    | 0    | 61333     | 5040     | 3982   |   | 0,256597   | 0        | 0,288154   |   | 0,544751     |
| 17          | Campinas ...    |       | 0          | 842      | 3980544   | 38136   | 0    | 33697     | 9968     | 55070  |   | 0          | 0        | 3,985093   |   | 3,985093     |
| 18          | Campes d ...    |       | 0          | 6        | -         | 38      | 0    | 390       | 0        | 1696   |   | 0          | 0        | 0,12273    |   | 0,12273      |
| 19          | Capão Bor ...   | 8353  | 7          | 6420     | 103321    |         | 2315 | 223360    | 113520   | 180319 |   | 0,775174   | 29,68553 | 13,04863   |   | 43,50933     |
| 20          | Caraguata ...   |       | 0          | -        | -         | -       | 0    | 0         | 0        | 0      |   | 0          | 0        | 0          |   | 0            |
| 21          | Catanduvi ...   |       | 0          | 33       | 10464174  | 184795  | 0    | 5036      | 4006     | 266    |   | 0          | 0        | 0,019249   |   | 0,019249     |
| 22          | Dracena (S...   |       | 0          | 429      | 7226300   | 40      | 0    | 1567      | 0        | 510    |   | 0          | 0        | 0,036906   |   | 0,036906     |
| 23          | Fernandó...     |       | 0          | 104      | 5615900   | 164752  | 0    | 24427     | 10205    | 0      |   | 0          | 0        | 0          |   | 0            |
| 24          | Franca (SF)...  |       | 0          | 122210   | 6515000   | 426884  | 0    | 32442     | 19752    | 735    |   | 0          | 0        | 0,053188   |   | 0,053188     |
| 25          | Franco da ...   |       | 0          | 2        | 2         | -       | 0    | 0         | 0        | 0      |   | 0          | 0        | 0          |   | 0            |

Fonte: o autor

Determinado esses índices foi calculada a Linha de Média Aritmética sobre os gráficos de barras do ICP (somatória dos IC de tomate, batata, maçã) e do ICFF (somatória dos IC de soja e milho). Dados discrepantes, acima da Linha de Média Aritmética foram plotados no mapa de Microrregiões do Estado de São Paulo demonstrando que localidades do Estado há maior probabilidade de uso muito acima da média de pesticidas e fertilizantes fosfáticos por hectare, mostrando maiores tendências de contaminação do solo. As localidades com ICP discrepante ficaram em destaque no mapa por linhas hachuradas em marrom, conforme se vê na Figura 35. Esse hachuramento conta com recurso de opacidade/transparência gráfica de 50%, de modo que a representação possa ser sobreposta a outros mapas para efeitos comparativos dos fenômenos geográficos.

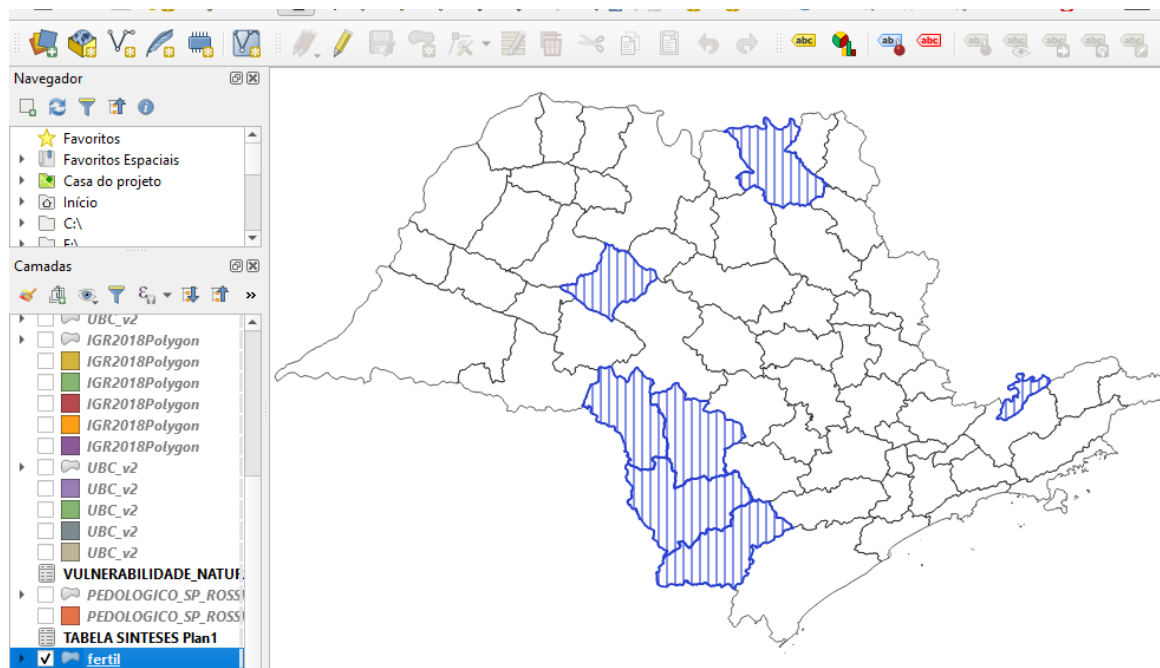
Figura 35– Áreas com alto Índice de Concentração de Pesticidas (ICP).



Fonte: o autor

Os fertilizantes fosfáticos, conforme levantamento bibliográfico, tendem a tornar chumbo e cádmio aculativo nos solos a longo prazo, inclusive com risco de que esses metais potencialmente tóxicos sejam absorvidos pelas plantações. Soja e milho, conforme o levantamento bibliográfico, são as culturas que fazem uso mais intenso de fertilizantes fosfáticos, por isso representam maior risco (SILVA, 2007). Utilizando-se a mesma metodologia de estabelecimento de Índices de Cultivo e linkando as regiões ao mapa de microrregiões, obteve-se uma nova imagem com as áreas ICFF acima da Média Aritmética no Estado de São Paulo, conforme a Figura 36. Essas áreas foram hachuradas em azul, também com recurso de opacidade/transparência gráfica de 50%, para permitir que a informação seja sobreposta a outros dados do mapa:

Figura 36– Áreas com alto Índice de Concentração de Fertilizantes Fosfáticos (ICFF).



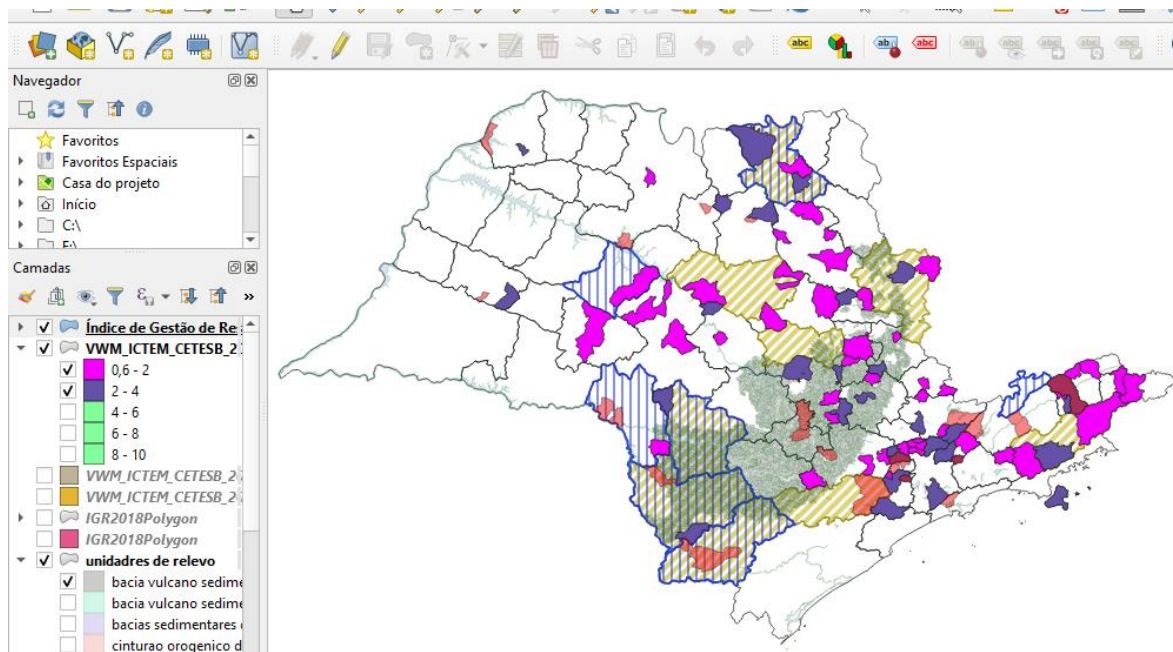
Fonte: o autor

**Camada 5:** mostra os principais cursos d'água do Estado, obtida através do mapa de solos de São Paulo, já utilizado anteriormente (Márcio Rossi (Instituto Florestal do Estado de São Paulo)).

**Camada 6:** está a divisão do território do Estado nas Microrregiões, obtida na Base de Dados Cartográficos do IBGE com recurso de transparência, permitindo que visualmente esteja sobreposto, para que o usuário consiga correlacionar os locais de problema com os municípios de análise.

Ao manipular as camadas, o usuário poderá encontrar diferentes informações correlacionáveis, como apresentado na Figura 37, podendo estabelecer várias interpretações que serão analisadas nos resultados e discussões.

Figura 37 – Exemplo do mapa combinando informações com diferentes potenciais áreas de risco de contaminação de solo.



Fonte: o autor

## 5.6. Layout e disponibilização em ambiente virtual

A comunicação visual de um mapa é parte fundamental do sucesso de um SIG. Segundo Martinelli, (2014), diante do usuário do mapa, ou de um Sistema de Informação Geográfica, o produtor do material precisa entender e respeitar as três particularidades de interesse pela informação disponível: leitura, análise e interpretação. A leitura é o primeiro contato do usuário com o material cartográfico, onde prontamente ele buscará identificar do que se trata o mapa, o que deve estar expresso de modo claro e sucinto no seu título, explicitando os dados de finalidade, local e tempo a respeito do tema. Todas as informações relacionadas às variáveis desse tema, que podem ser qualitativas, quantitativas ou ordenativas, precisam estar representadas nas legendas de modo coerente entre o objeto em análise e a simbologia mais adequada. Também nessa fase, deve estar explícito ao leitor todas as fontes e bases de dados que foram empregados para se chegar ao final do mapa. Na maioria das vezes, também, é conveniente a representação de uma escala numérica ou gráfica, que dê ao leitor uma noção das relações de proporção entre o desenho do mapa e o mundo real a que se refere, além dos indicadores de rede

geográfica, para que o leitor possa ter um posicionamento mais preciso dos dados num modelo georreferenciado.

Na fase de análise, o usuário do mapa passa a estabelecer correlações entre as informações dentro da própria representação, comparando regiões e valores. É importante que a comunicação visual do mapa seja suficientemente intuitiva para aliviar o leitor do trabalho de precisar continuamente direcionar os olhos para a legenda, tentando interpretar o significado das feições, o que pode prejudicar sua atenção e gerar cansaço (MOREIRA, 2003).

Por fim, na fase de interpretação, o usuário irá correlacionar as informações do mapa com outras informações externas (textos, tabelas e conhecimento empírico) de modo que o fornecimento da base de dados adquira importância ainda maior, para que o usuário possa refletir sobre incongruências ou generalizações que inevitavelmente ocorrem quando as informações do mundo real são sintetizadas pela estatística e pela simbologia gráfica.

A principal diferença entre o SIG e um mapa estático é que os Sistemas Informatizados permitem que o usuário filtre camadas de representações, facilitando a leitura de mapas que a princípio podem parecer demasiadamente congestionados. Por outro lado, nas fases de análise e interpretação, essa possibilidade de seleção de camadas simbólicas dá ao usuário o poder de estabelecer claramente quais são as relações de causa e efeito entre os fenômenos cartografados que encontram uma evidente correção sobre o espaço geográfico (LUCHIARI, 2005).

Dentro da conceituação de Silva, (2003), a proposta de operação deste SIG é de um sistema de “mapas fundidos”, que trazem resultados gráficos de operações algébricas com outras fontes de dados (tabelas, gráficos e dados gráficos básicos) ou pontos que fazem link com outras plataformas. A proposta é que, além dos mapas sintetizarem informações estatísticas diversas, como volumes de produção agropecuária ou índices de qualidade ambiental, fornecidos por órgãos variados de informação, o usuário possa interagir com o sistema sob três formas:

- 1) Manipulando as camadas de informação, de acordo com os interesses particulares.

- 2) Fornecer *links* de pesquisas na área de biocarvão que podem ser plotados sobre os mapas de acordo com os locais onde as pesquisas foram feitas, através do sistema de coordenadas.

3) Fornecer dados e pesquisas que permitam ajustar os índices das tabelas de síntese estatística, como os cofatores regionais, ou a produção efetiva de resíduos de cada produto de acordo com os contextos tecnológicos e macroeconômicos de cada momento.

No anexo do trabalho, podem ser encontrados os mapas principais que compõem o SIG bem como suas arquiteturas de construção e interação com o usuário: mapa 1 “relação entre produção agropecuária e resíduos não aproveitados”; mapa 2 “potencialidades dos solos para projetos de biocarvão” e mapa 3 “áreas com alto risco de contaminação de solo”. O SIG, obviamente, não se restringe a esses mapas, mas a diversos outros que podem ser re-configurados de acordo com a manipulação das camadas, tornando sua leitura mais simples ou mais elaborada. Em particular, o mapa 2 “potencialidades dos solos para projetos de biocarvão” tem um mecanismo interativo bastante peculiar, pois permite ser lido em escalas diversas de ampliação, de modo que o usuário encontra informações bastante específicas de alguma área de interesse. Por conta dessa particularidade, e como o meio de acesso aos locais de interesse se dá fundamentalmente pela digitação do sistema de Coordenadas Geográficas, é o único, entre os três mapas, que mantém a quadrícula de Coordenadas Geográficas traçada sobre a representação toda.

Por fim, considerando que o objetivo do projeto é mais uma proposta metodológica do que um conjunto de produtos cartográficos finais, a estrutura geral, de simbologia, arquitetura de dados e estruturação de camadas, foi pensada de modo que ele possa ser aplicado a outros mapas do Estado de São Paulo, dependendo, entretanto, do fornecimento adequado de dados estatísticos produzidos pelas Secretarias Estaduais de Planejamento de cada Estado da Federação.

## 6. DISCUSSÃO

O princípio geral do SIG é que uma ampla variedade de mapas temáticos, tanto de caráter qualitativo quanto quantitativo possam ser construídos pelo usuário, de modo que ele consiga estabelecer correlações de informações, construir hipóteses e caminhos de investigação (MOREIRA, 2003). No momento, esse uso ainda é limitado, pois, como exposto no princípio do projeto, estabeleceu-se aqui apenas a metodologia da construção do SIG, sendo que sua funcionalidade só será realmente confiável, quando tiver à disposição um volume maior e mais preciso de informações, principalmente no que se refere ao volume de resíduos que cada tipo de cultivo gera e que podem ser potencialmente convertidos em biocarvão.

O SIG pode ter também outras aplicabilidades, não apenas na área de estudo do biocarvão, mas de diversas tecnologias que busquem dar um aproveitamento mais eficiente a resíduos agropecuários, ou então, compreender melhor as áreas de risco de contaminação e degradação dos aquíferos.

### 6.1. O SIG aplicado à análise de produção agrícola e produção de resíduos.

Embora os dados sobre resíduos não sejam ainda confiáveis, pela falta de informações mais precisas, o comparativo dos dois mapas, da Figura 39, com a localização das regiões na Figura 38, destaca que a produção de resíduos agroindustriais não acompanha exatamente o volume de produção de uma região. Constata-se que as microrregiões de Tatuí, Botucatu, Piracicaba, Sorocaba, Itapetininga e Itapeva apresentam geração de resíduos pouco expressiva, apesar da elevada produção agrícola local. São José do Rio Preto, São Joaquim da Barra e Ribeirão Preto são as áreas com maior potencialidade para fornecimento de matéria prima para conversão em biocarvão.

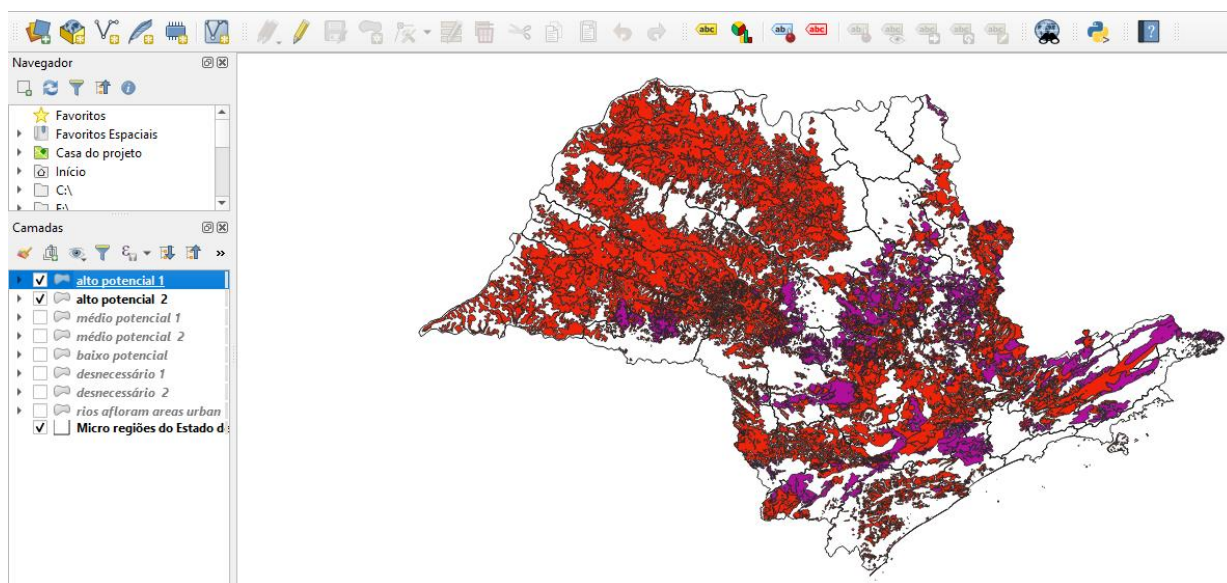


de Ribeirão Preto e São Joaquim da Barra, em que a produção de resíduos é significativamente mais expressiva, destacam-se o algodão, a laranja e a cana.

## 6.2. O SIG aplicado à análise de solos

São José do Rio Preto é nitidamente uma região com grande produção agrícola e alta geração de resíduos. Seria interessante converter esses resíduos em biocarvão para preservar a continuidade produtiva dessa área? O usuário poderá consultar o mapa de potencialidades do biocarvão em relação ao solo, como indicado na Figura 40, e solicitar a representação das áreas em que o biocarvão tem mais papel para contribuir na aplicação (vermelho e roxo). Ele perceberá que, de fato, o predomínio de latossolos em São José do Rio Preto, (dependentes de manejos contínuos para evitar o empobrecimento e arenização), tem potencial para reverter os resíduos, principalmente da cana, para esse tipo de aplicação (MADARI, 2006) (LEHMANN, 2007). O biocarvão produzido nessa área, que têm de fato volumes de resíduos bastante significativo, poderá evoluir para Oeste, onde Votuporanga tem condições de solo semelhantes, mas encontrará pouca atração no sentido Leste, onde Barretos e São Joaquim da Barra têm realidades pedológicas mais distintas.

Figura 40– Modelo de produção do mapa de potencialidades do biocarvão em relação ao solo



Os solos arenosos da região da Depressão Periférica, indicados pelas manchas roxas no centro do mapa, também são potencialmente beneficiados com a contribuição do Biocarvão, tanto para a melhoria do fluxo hídrico como pela liberação de nutrientes e nitrogênio de longo prazo, características que lhes são deficitárias (CARVALHO *et al.*, 2014) (CUNHA *et al.*, 2009).

Comparado aos mapas anteriores, de produção total e produção de resíduos de biomassa, o pesquisador perceberá que há uma forte produção agrícola na área, mas com oferta de resíduo relativamente baixa. Isso leva à percepção de que nessas áreas é interessante a busca por fontes de biomassa residual alternativas, uma vez que a produção agropecuária local não gera resíduos suficientes para sustentar uma cadeia economicamente rentável de fornecimento e comercialização de biocarvão.

Há fontes de biomassa que são totalmente alheias às cadeias de produção agropecuária, desde podas urbanas a maços de cigarro apreendidos pela polícia federal e que se tornam um problema de estocagem a longo prazo (MENDES, 2019). Muitas vezes essas pesquisas indicam a viabilidade de uso desses materiais como fontes para produção de biocarvão, mas não dispõe de dados para indicar “onde” a sua aplicação seria mais receptiva ou não.

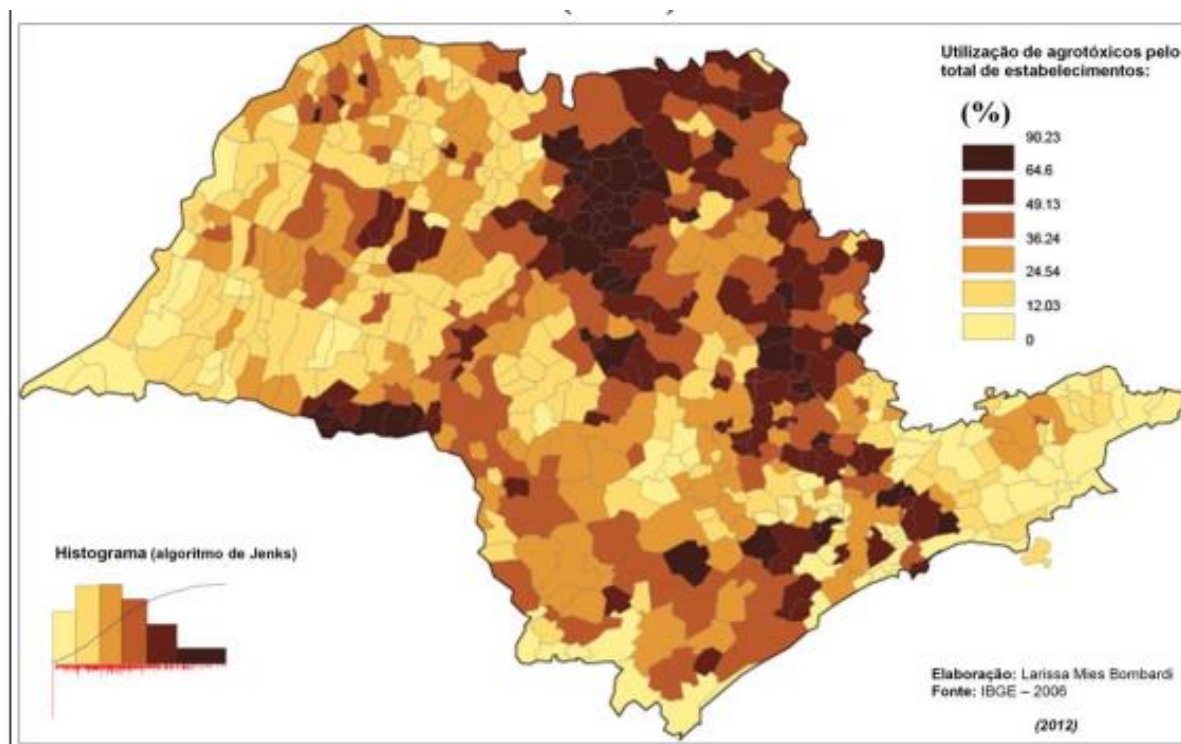
A análise combinada dos mapas apresentados traz respostas dessa ordem, norteando uma sequência logística entre fonte da biomassa, trajeto e locais de aplicação.

### **6.3. O SIG aplicado à análise ambiental**

Em outra linha de análise, o usuário pode indagar em quais áreas os projetos de aplicação de resíduos para descontaminação de solo encontrariam mais apelo e interesse.

O mapa da Figura 41, produzido por Bombardi, (2012), com dados de 2006, apresenta o volume geral de utilização de agrotóxicos por estabelecimento no Estado de São Paulo.

Figura 41 - Utilização de Agrotóxicos por Municípios no Estado de São Paulo (2006)



Fonte: BOMBARDI, 2012

Pela interpretação dessa imagem, o centro norte do Estado desponta como a região de uso mais intenso, e consequentemente, mais crítico, de aplicação de agrotóxicos. No estudo de Bombardi, (2012), assim como no seu Atlas de 2017, são apresentados os volumes totais empregados por município, indistintamente quanto à categoria de agrotóxico e com base nos dados oficiais de comercialização. Também não há uma correlação entre volume de agrotóxico por hectare, que indica a variável de dispersão ou concentração desses compostos químicos no solo e nos corpos hídricos.

Sem discordar da relevância desse estudo e não partidarizando a análise no embate ideológico sobre o papel social da agroindústria, a presente pesquisa estabelece uma metodologia diferente para avaliar as áreas críticas de contaminação por agrotóxicos. Levando-se em conta que a terminologia “agrotóxico” abarca duas grandes categorias distintas (herbicidas e pesticidas) as duas formas de identificação de áreas críticas não são opostas, mas sim, complementares.

No mapa de Bombardi, o alto volume de aplicação de agrotóxicos na região centro-norte do Estado decorre principalmente do uso de herbicidas glifosato das

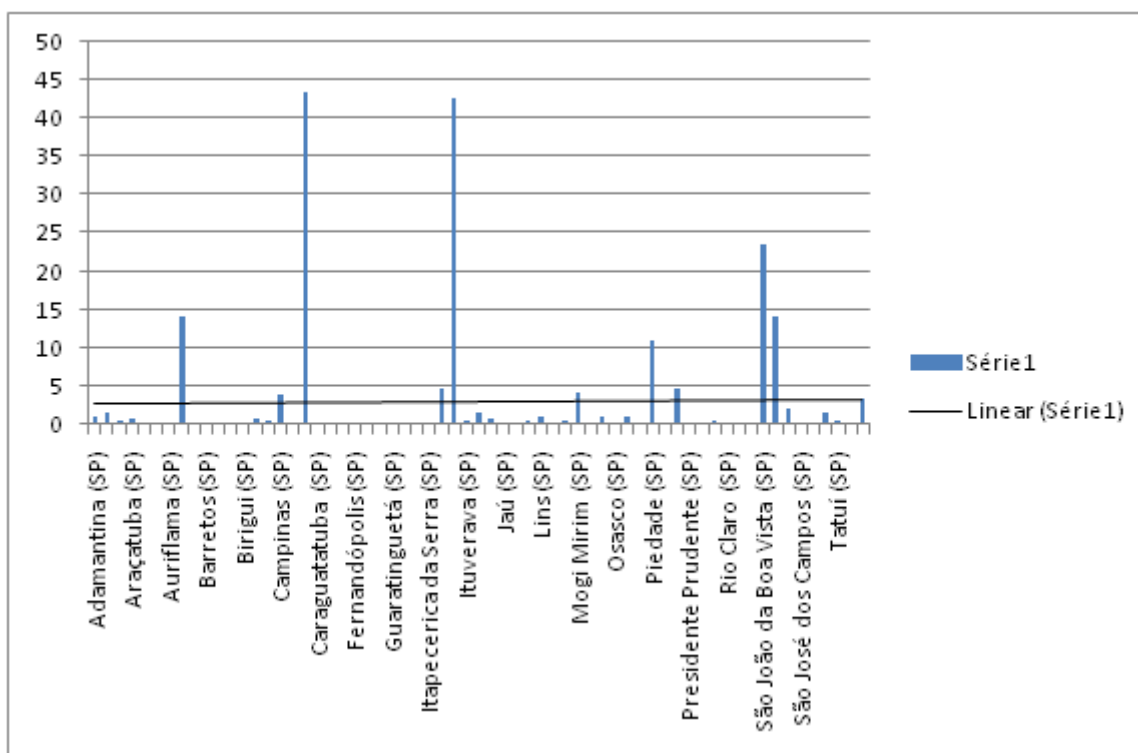
grandes propriedades fornecedoras de soja, milho e cana de açúcar. Assim, a metodologia de produção do mapa proposto pela autora pode ser incorporada ao presente SIG direcionando especificamente os estudos sobre sorção de herbicidas por biocarvão.

Para considerarmos estudos mais específicos sobre pesticidas, o projeto desenvolvido aqui considera que os dados oficiais sobre aquisição e aplicação de agrotóxicos por área agrícola são pouco confiáveis, uma vez que há grande emprego desses produtos sem registro, fato reconhecido pelos próprios órgãos fiscalizadores. Com base nessas premissas, o projeto levantou os produtos com maior uso de pesticidas por hectares e as áreas onde o cultivo desses produtos mais tem destaque, chegando aos produtos tomate, batata inglesa e maçã como aqueles que apresentam valores bem acima da média de outros quanto ao uso de pesticidas por área (USP ESALQ, 2020).

Nesses produtos, há também, diferentes modelos produtivos, desde a agricultura familiar de subsistência até grandes propriedades associadas às fábricas de alimentos processados. Essa variedade acaba por mostrar mais riscos, pois envolve produtores que nem sempre atentam para os limites adequados de aplicação dos químicos na lavoura.

Estabelecido o ICP (Índice de Concentração de Pesticidas) conforme apresentado na seção Metodologia, as microrregiões computadas foram comparadas à partir de um gráfico de barras simples, demonstrado na Figura 42.

Figura 42 - Índice de Concentração de Pesticidas no Estado de São Paulo



Fonte: o autor

Com isso foram selecionados 6 micro-regiões com índice de concentração bastante discrepantes, bem acima da Média Aritmética (Tabela 11) e três microrregiões com valores ligeiramente acima da Média Aritmética (Tabela 12)

Tabela 11 - Microrregiões com ICP de alta discrepância

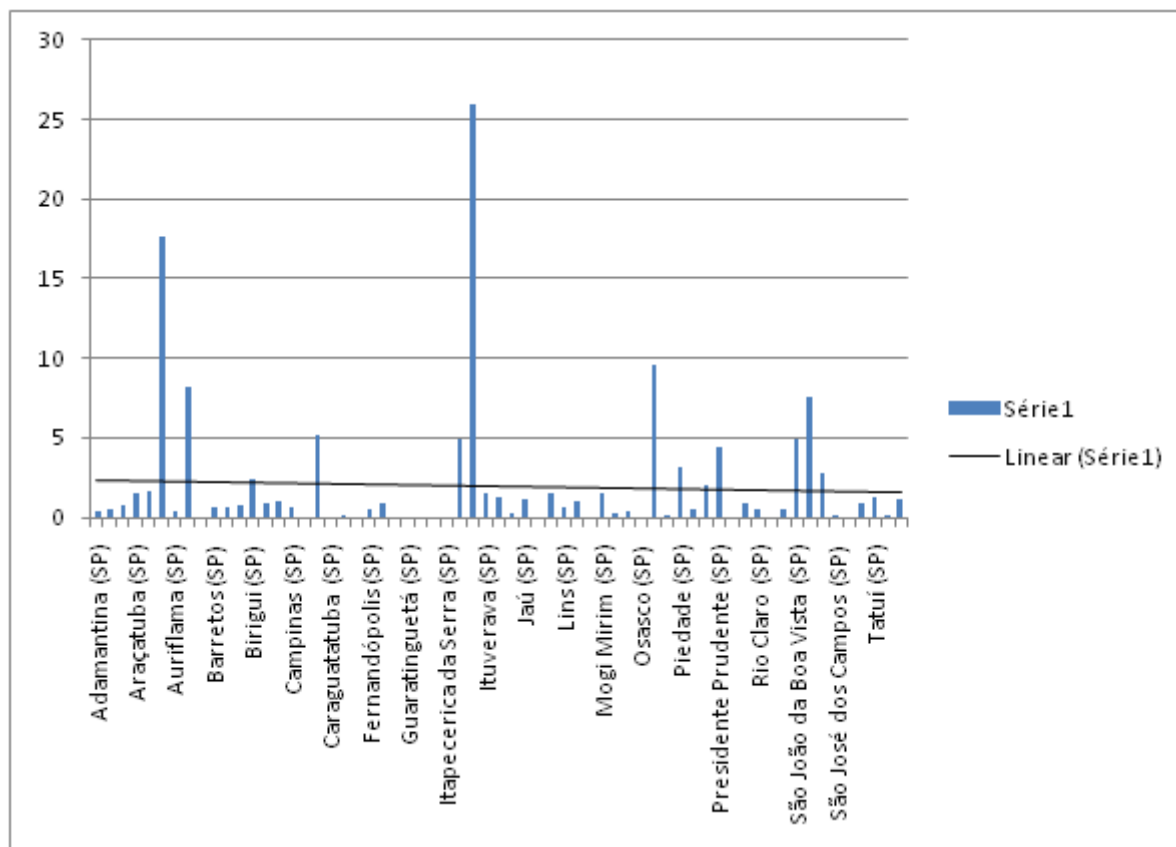
| Microrregião          | ICP – Índice de Concentração de Pesticidas |
|-----------------------|--------------------------------------------|
| São Joaquim da Barra  | 14,04                                      |
| São João da Boa Vista | 23,05                                      |
| Piedade               | 10,88                                      |
| Itapeva               | 42,62                                      |
| Capão Bonito          | 43,51                                      |
| Avaré                 | 14,04                                      |

Tabela 12 – Microrregiões com ICP ligeiramente acima da média

| <b>Microrregião</b> | <b>ICP – Índice de Concentração de Pesticidas</b> |
|---------------------|---------------------------------------------------|
| Pirassununga        | 4,6                                               |
| Mogi Mirim          | 4,09                                              |
| Itapetininga        | 4,66                                              |

Utilizando-se do mesmo raciocínio, a seleção do ICFF (Índice de Concentração de Fertilizantes Fosfáticos) selecionou as microrregiões onde há maior cultivo de milho e soja, culturas que tradicionalmente usam alto emprego dessa categoria de fertilizante por hectare. A apresentação gráfica dos dados num gráfico de barras (Figura 43), indicou 11 microrregiões com valores acima da Média Aritmética, tendo 5 microrregiões com alta discrepância de valores (Tabela 13) e 6 microrregiões com valores ligeiramente acima da Média Aritmética (Tabela 14).

Figura 43- Índice de Concentração de Fertilizantes Fosfáticos no Estado de São Paulo



Fonte: o autor

Tabela 13 - Microrregiões com ICFF de alta discrepância

| Microrregião         | ICFF – Índice de Concentração de Fertilizantes Fosfáticos |
|----------------------|-----------------------------------------------------------|
| Assis                | 17,59                                                     |
| Avaré                | 8,24                                                      |
| Itapeva              | 25,91                                                     |
| Ourinhos             | 9,61                                                      |
| São Joaquim da Barra | 7,51                                                      |

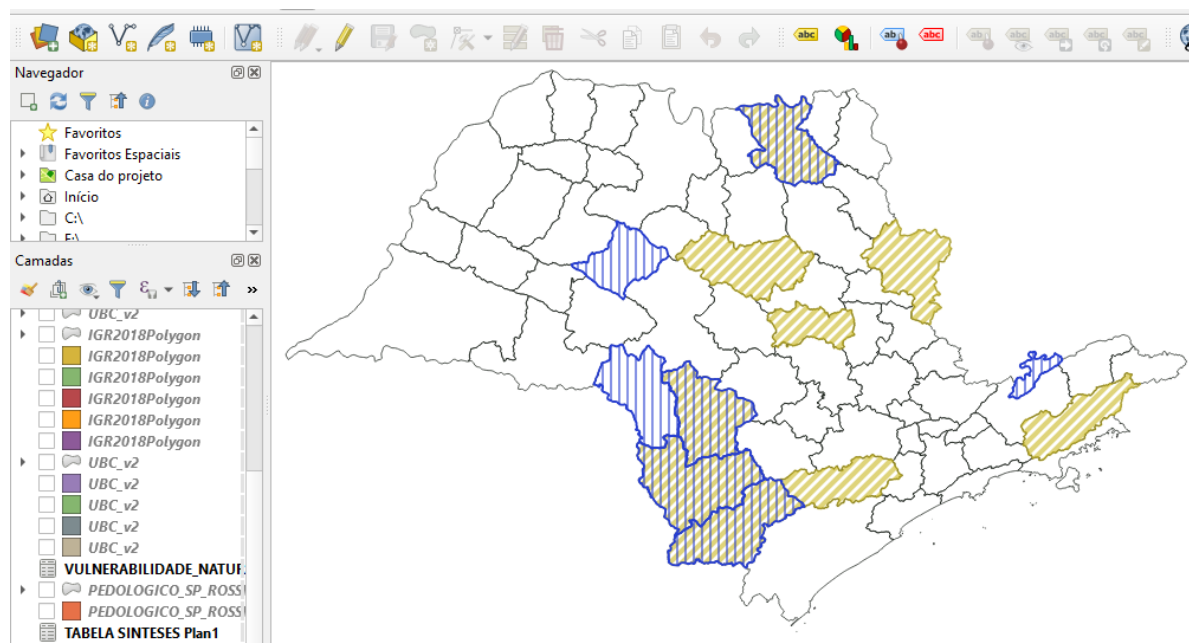
Tabela 14 - Microrregiões com ICFF ligeiramente acima da média

| <b>Microrregião</b>   | <b>ICFF – Índice de Concentração de Fertilizantes Fosfáticos</b> |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------|
| Capão Bonito          | 5,23                                                             |
| Itapetininga          | 4,91                                                             |
| Piedade               | 3,21                                                             |
| Presidente Prudente   | 4,43                                                             |
| São João da Boa Vista | 4,94                                                             |
| São José do Rio Preto | 2,92                                                             |

Aplicados tais conceitos ao SIG, o usuário ao selecionar na mapa de condição ambiental as camadas “alto uso de pesticidas” (hachurado marrom) e “alto uso de fertilizantes fosfáticos (hachurado azul) encontrará quatro microrregiões de intersecção, três ao sul e uma ao norte do Estado (Figura 44).

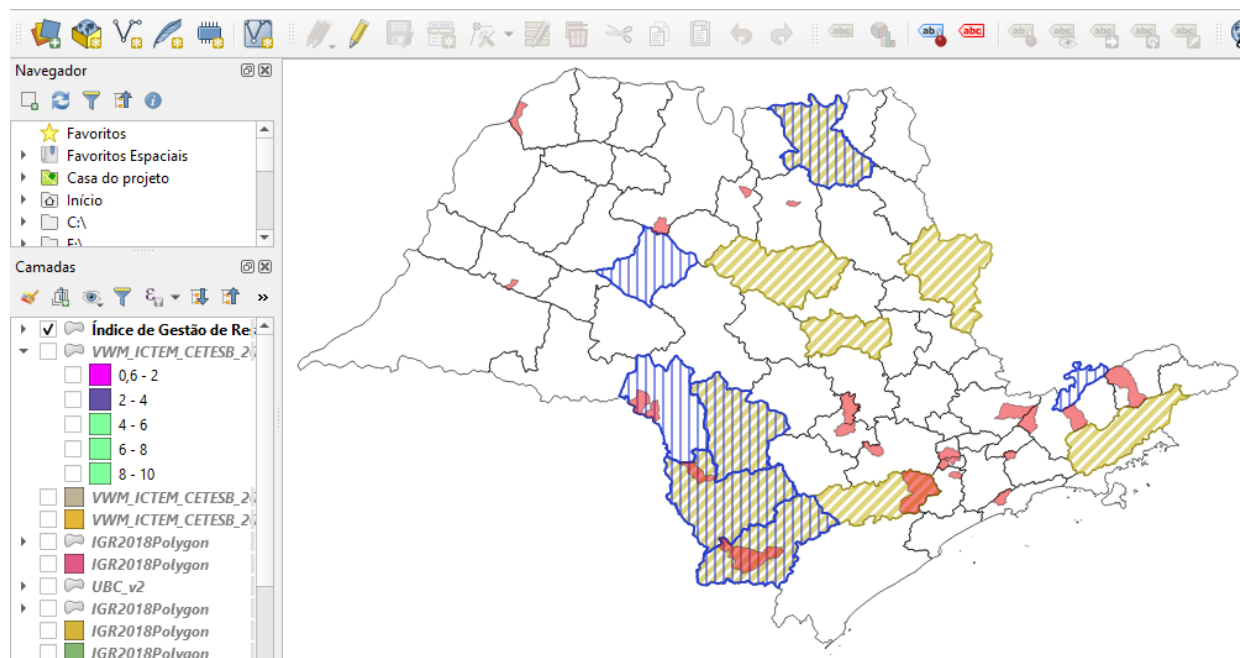
Se acrescentar a representação de Aterros Sanitários classificados como impróprios, o usuário perceberá que 3 desses aterros estão justamente na zona da intersecção anterior, demonstrando uma situação de gravidade quanto ao risco de contaminação do solo no Sul Paulista, como representado na Figura 45.

Figura 44– Exibição combinada de uso de zonas de alto uso de Pesticidas e alto uso de Fertilizantes Fosfáticos.



Fonte: o autor

Figura 45 – Acréscimo da camada “aterros sanitários irregulares”.



Fonte: o autor

E por fim, ao analisar essas informações sobre a representação da rede hidrográfica e da área de Recarga do Aquífero, a gravidade dessa zona de contaminação do solo ficará ainda mais evidente, como se vê na Figura 46, nas regiões de Limeira, Rio Claro e mais ao sul, em Itapeva e Avaré.

Figura 46– Áreas com maiores problemas de contaminação do solo coincidentes com a Área de Recarga do Aquífero Guaraní.



É sempre importante que o usuário compreenda a estrutura das informações para saber utilizá-la racionalmente. O mapa indica Aterros Sem Controle Sanitário. Não significa exatamente que sejam os piores aterros do Estado. Um aterro sem controle de chorume numa cidade com poucos habitantes pode ser menos nocivo ao ambiente do que um aterro com controle mediano de uma região superpopulosa.

## 7. CONCLUSÃO

A estrutura do SIG elaborado é uma metodologia proposta para orientar a construção de um site de compartilhamento de informações, pesquisas e tecnologias relacionadas ao biocarvão e outras formas de aproveitamento e usos sustentáveis para resíduos agro-industriais. Os mapas produzidos, embora sejam uma mostra do que o SIG objetiva e pode alcançar, não são tomados ainda como resultados finais, uma vez que carecem de pesquisas aprofundadas sobre resíduos agro-industriais, formas de aproveitamento e variáveis regionais com influência sobre os valores específicos de cada localidade.

Como todos os mapas produzidos por arquivos Shapefile são georreferenciados, isso permite que estudantes e profissionais que estejam interessados em disponibilizar suas pesquisas sobre o tema e que disponham das coordenadas dos locais onde aplicaram experimentos práticos, possam expor esses dados já plotados sobre os mapas, juntamente com as colaborações de outros profissionais, de modo que, através da produção coletiva de conhecimento, o SIG atinja um estágio aplicável.

Pretende-se com isso criar uma base de compartilhamento de conhecimentos, não apenas sobre biocarvão, mas também sobre pesquisas de redirecionamento ecológico de resíduos de origens diversas, analisando geograficamente esses dados e deixando mais claras as variáveis influenciadoras sobre a eficácia desses projetos em linhas de ações diversas.

O QGIS mostrou-se um aplicativo bastante funcional até aqui para a elaboração de mapas temáticos. Para habilitar maior interatividade e dinâmica dos mapas por compartilhamento coletivo de informações, é necessária a seleção de plug-ins de disponibilização de mapas dinâmicos em sites. Por se tratar de uma grande massa de dados, eles só podem ser efetivamente manipulados pelo público geral se tais dados estiverem armazenados em provedores pagos, o que implica em custo para a manutenção do site. Por outro lado, os levantamentos de cada base de dados do IBGE-SIDRA não podem ser linkados automaticamente com a base cartográfica. Isso demanda um ou mais profissionais periodicamente alimentando e monitorando os dados, para que esse sistema integrado virtual de compartilhamentos seja de fato funcional. Essas condições operacionais trazem

custos, exigindo que o site se sustente por anúncios publicitários, por venda de informações, ou ainda, esteja atrelado a uma instituição pública com verba para a cobertura desses investimentos.

Quanto à possibilidade de que a metodologia proposta possa ser reproduzida em outros Estados da Federação é necessário distinguir as bases de dados provenientes do IBGE, que seguem um mesmo padrão para todo o país, e os dados ambientais, que são produzidos em sua maior parte por órgãos estaduais, como a disponibilidade de Índices de Qualidade Ambiental, como Gestão de Resíduos e Qualidade de Saneamento, que sigam metodologias semelhantes àquela aplicada pela CETESB.

Mesmo que, ainda em fase de desenvolvimento, o SIG foi capaz de fornecer informações relevantes quanto às possibilidades de emprego do biocarvão no Estado de São Paulo, tanto para fins de incremento da produção agrícola como para identificação de áreas com necessidade prioritária de projetos para conservação e recuperação de solos.

Na questão de produção agrícola, os mapas demonstram que há discrepâncias entre o volume total de produção agrícola de uma região e o quanto ela disponibiliza de resíduos que possam ser convertidos em biocarvão. Também é possível, pelo SIG, ter uma noção antecipada sobre regiões do território onde projetos de aplicação do biocarvão terão melhores resultados, seja por especificidades locais do solo, seja pela compreensão da cadeia de oferta de resíduos, transporte, conversão e aplicação do biocarvão, dimensionados em volume e distâncias de transporte.

Em termos de cuidados sobre contaminação do solo, o SIG mostrou-se bastante eficaz na identificação de áreas de risco. O Aquífero Guarani, que necessita ser tratado como um dos recursos prioritários do Estado por conta de seu fornecimento hídrico às cidades e fazendas irrigadas do Oeste Paulista, apresenta evidentes pontos de fragilidade e risco de contaminação. A apresentação desses pontos críticos sobre uma base cartográfica, em representações correlacionáveis e comparativas, orienta melhor as estratégias públicas que precisam de intervenção mais urgente, seja aplicando medidas para redução da emissão de cargas poluentes, seja em programas de remediação e tratamento sanitário dos solos, com possível emprego das possibilidades que o biocarvão pode vir a oferecer.

## 8. REFERÊNCIAS

ABRELPE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, relatório 2018, 2019** Disponível em:<file:///C:/Users/PC/Downloads/PanoramaAbrelpe\_-2018\_2019.pdf> Acesso em: 15 de Set 2020.

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

AGROSABER, **Atlas do agrotóxico apresenta dados incorretos**, página digital, 2019. Disponível em: <<https://agrosaber.com.br/atlas-dos-agrotoxicos-apresenta-dados-incorretos/>> Acesso em: 10 set 2020.

AHMAD, M. *et al.* Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. **Chemosphere**, v. 99, p. 19–23, 2014.Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/259107908\\_Biochar\\_as\\_a\\_sorbent\\_for\\_contaminant\\_management\\_in\\_soil\\_and\\_water\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/259107908_Biochar_as_a_sorbent_for_contaminant_management_in_soil_and_water_A_review). Acesso em: 14 out 2019.

ALEXANDRINO Ana Maria, FARIA Haroldo Garcia de, SOUZA Cristina Giatti Marques de, PERALTA Rosane Marina.Aproveitamento do resíduo de laranja para a produção de enzimas lignocelulolíticas por *Pleurotus ostreatus*, **Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, SP, v. 27, n. 2, p. 364-368, abr.-jun, 2007.

ALTENHOFEN , Thaíse Schiavon , DE SÁ, Jocelito Saccol , FABIÃO, Beatriz Regina Pedrotti.Panorama do reaproveitamento de resíduos de madeira gerados em serrarias no município de Pelotas, RS. In:SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL, ABES, 11, 2018, Porto Alegre.**Anais** [...]. Porto Alegre, RS:Associação Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2018.

ALVAREZ, Pedro J.J.; ILLMAN, Walter Ilman. **Bioremediation and natural attenuation: process fundamentals and mathematical models**. New Jersey: Wiley-Interscience, 2005.

ANDRADE, José Mário Ferreira de Andrade, DINIZ, Kátia Maria. **Impactos Ambientais da Agroindústria da Cana-de-açúcar: Subsídios para a Gestão**. 2007. Monografia (Especialista em Gerenciamento Ambiental) -Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2007.

ANDRADE, Maurício Gomes de, MELO, Vander de Freitas, GABARDO, Juarez, SOUZA, Luiz Cláudio de Paula, REISSMANN, Carlos Bruno. Metais pesados em solos de área de mineração e metalurgia de chumbo – fitoextração, **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, MG, v.33 n.6, p. 1879-1888, 2009.

ASSUMPÇÃO, Maria Heloisa P. L. *et al.* **Inventário estadual de resíduos sólidos urbanos 2019**. São Paulo: CETESB, 2020.

ARAUJO, W. S.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; MAZUR, N.; GOMES, P. C. Relação entre adsorção de metais pesados e atributos químicos e físicos de classes de solo do Brasil. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.26, n.1, p. 17-27, 2002

B2WOOD, **Conversão de madeira**. Disponível em: <<https://www.b2wood.com/informacoes-e-noticias/informacoes/conversao-de-madeira/>> Acesso em: 14 set 2020.

BARBOSA, Paula Regina Coeli, BORBA, Ricardo Perobelli, SILVA, Wanilson Luiz, COSCIONE, Aline Renee, CAMARGO, Otávio de Antônio. Uso do biocarvão de bagaço de cana na remoção de metais pesados de água sob diferentes condições de pHs. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE MEIO AMBIENTE SUBTERRÂNEO, 3. 2013, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2013.

BEIGUELMAN, Bernardo. **Curso prático de bioestatística**. Ribeirão Preto, SP: Fundação de Pesquisas Científicas de Ribeirão Preto, 2002.

BOLFE, Édson Luis; VICENTE, Luiz Eduardo; ANDRADE, Ricardo Guimarães; VICTÓRIA, Daniel de Castro; BATISTELLA, Mateus. **A evolução histórica dos Sistemas de Informações Geográficas**. Campinas, SP: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2011.

BOMBARDI, Larissa Mies. Agrotóxicos e agronegócio: arcaico e moderno se fundem no campo brasileiro. In: **Direitos humanos no Brasil 2012: relatório da Rede Social de Justiça e Direitos Humanos**. São Paulo: Rede Social de Justiça e Direitos Humanos, 2012.

BOMBARDI, Larissa Mies. **Geografia do Uso de Agrotóxicos no Brasil e Conexões com a União Europeia**. São Paulo: Laboratório de Geografia Agrária, FFLCH - USP, 2017.

BOSCOV, Maria Eugênia Gimenez. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de textos, 2008.

CARVALHO, Flávio Condé de. Disponibilidade de resíduos agroindustriais e do beneficiamento de produtos agrícolas. **Informações Econômicas**, v.22, n.12, p. 31-46, dez.1992

CUNHA, Fernanda Gonçalves da. **Contaminação humana e ambiental por chumbo no Vale do Ribeira, nos estados de São Paulo e Paraná/Brasil**. Tese (Doutorado em Metalogênes) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 2003.

CETESB. **Resíduos urbanos, de serviços de saúde e da construção civil – CETESB 2020**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/residuossolidos/residuos-urbanos-saude-construcao-civil/introducao/>. Acesso em: 14 set 2020.

CRIZEL, Tainara de Moraes. **Aproveitamento dos subprodutos da indústria de suco de laranja para aplicação em alimentos**. Tese (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Instituto de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2013.

CUNHA, Sandra Baptista. Geomorfologia Fluvial. In: GUERRA, J. T.; CUNHA, S. B. (org). **Geomorfologia, uma atualização de bases e conceitos**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995.

CUNHA, T. J.F.; MARADI, B. E.; CANELLAS, L.P.; RIBEIRO, L.P.; BENITES, V. M.; SANTOS, G. A. Soil organic matter and fertility of anthropogenic dark earths (Terra Preta de Índio) in the Brazilian amazon basin, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, p.85-93, 2009.

CUNNIGHAM, S.D.; ANDERSON, T.A.; SCHWAB, A.P. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. **Advances in Agronomy**, v. 56, p. 55-114, 1996.

DA COSTA, Marco Antonio F; BARROZO DA COSTA, Maria de Fatima. **Projeto de Pesquisa: Entenda e Faça**. 6ª ed. Campinas: Editora Vozes, 2015.

DA SILVA, Douglas Ferreira da; MARQUES SILVA, L.; PEREIRA SANTOS, S.; DA SILVA BORGES, W. **Aproveitamento de resíduos da laranja: uma revisão**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA. 58. 2018, São Luis. **Anais [...]**. São Luís, MA: Associação Brasileira de Química, 2018.

DA SILVA, Elexandre; FRANÇA, Leonardo Pires; NASCIMENTO, Mari Marni G. Soares; ZOPELARO, Raul Martins; NETO, Oscar Chaves; SOARES Rosana Aparecida Ravaglia; GENESTRA, Marcelo. Propostas à Prevenção de Riscos Ambientais relacionados ao Tratamento de Superfície com Cromatos. **Cadernos UNIFOA**, Volta Redonda, v. 3, Edição Especial, p. 48-58, maio, 2008.

DA SILVA, Leandro Muniz; DA SILVA, Julio Pergentino; BORGES, Maria Alice de Lira. Do global ao contexto nacional: evolução da política ambiental

brasileira. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 6, n. 14, p. 593-608. ISSN 2359-1412, 2019. Disponível em:  
<<https://doi.org/10.21438/rbgas.061401>>. Acesso em: 12 maio 2020.

DA SILVA, Jaqueline de Santana, SANTOS, Shalene da Silva, GOMES, Felipe George Gatti. A biotecnologia como estratégias de reversão de áreas contaminadas por resíduos sólidos. **Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas- Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 18, n. 4, p. 1361-1370, 2014.

DA SILVA, Janduir Egito. **Resíduos culturais de algodão naturalmente colorido para produção de biocombustíveis e aromáticos renováveis**. Tese (Doutorado) - Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal, 2019.

DE QUEIROZ NETO, José Pereira. **Pedologia: conceito, método e aplicações**. Revista Do Departamento De Geografia, v. 3, p. 95-102, São Paulo, 1984.

DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. (Eds.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico 2008.

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2. Edição revista e atualizada. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997.

EMBRAPA. **Avaliação Visual para o Monitoramento da Qualidade Estrutural do Solo: VESS e VSA**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2015. 39 p. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/125514/1/Documento-390.pdf>>

EMBRAPA. **Sistema de Inteligência Territorial Estratégica da Macrologística Agropecuária Brasileira: Produção agropecuária: dados 2016**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/macrologistica/producao-agropecuaria>. Acesso em: 8 set 2020.

ESPINDOLA, Carlos Roberto. A pedologia e a evolução das paisagens. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 31, n. 1/2, p. 67-92, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5935/0100-929X.20100005>.

ESPINOZA, André Luiz de Freitas; SOUZA Heiriane Martins; SPERATTI, Alicia B., COUTO, Eduardo Guimarães, SCARAMUZZA, José Fernando; JOHNSON, Mark S. Efeitos de 12 tipos de biocarvão na produção de biomassa de *Zea mays*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 35., 2015, Natal, RN. **Anais [...]**. 2015.

FARIA, Gabriel. Biocarvão feito com resíduos é testado como condicionador de solo. EMBRAPA Agrossilvipastoril, out 2017, Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/28595289/biocarvao-feito-com-residuos-e-testado-como-condicionador-de-solo>. Acesso em 9 set 2020.

FARIA, W. S.; PROTÁSIO, T. DE P.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. DE C. O.; ANDRADE, C. R.; GUIMARÃES JUNIOR, J. B. Transformação dos resíduos lignocelulósicos da cafeicultura em Pellets para geração de energia Térmica. **Coffee Science**, Lavras, v. 11, n. 1, p. 137 - 147, jan-mar, 2016.

FEITOSA, Amanda Alves, TEIXEIRA, Wenceslau Geraldes; NOGUEIRA, Júlia do Nascimento Pereira; REZENDE, Fabiana Abreu de; KERN, Jürgen. Caracterização de resíduos carbonizados (biochar) de casca de banana e bagaço de laranja para uso agrícola. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 36., 2017, Belém, PA. **Anais [...]**. Belém, PA: EMBRAPA Solos, 2017.

FERREIRA JUNIOR, Rogério. Cama de frango vira adubo. **Revista Globo Rural**, Itaú de Minas, MG, Jul 2011. Disponível em: <http://revistagloborural.globo.com/Revista/Common/0,EMI246995-18289,00-CAMA+DE+FRANGO+VIRA+ADUBO.html>, Acesso em: 12 set 2020.

FERREIRA, Karine, CASANOVA Marco Antonio, QUEIROZ, Gilberto Ribeiro de, OLIVEIRA, Olga FradicoArquiteturas e Linguagens *In* CASANOVA, Marco Antônio et al. (org) **Banco de Dados Geográficos**. Curitiba, PR: MundoGEO, 2005.

GARCIA, Natalia Nunes. **Uso do lodo de flotador de abatedouro de aves na produção de biochar**. Trabalho de conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Ambiental) -Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, PR, 2016.

GOMES, Frederico Pimentel, GARCIA, Carlos Henrique, **Estatística aplicada a experimentos agronômicos e florestais: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos**. Piracicaba, SP: FEALQ, 2002.

GOMES, Mariana Rezende; ROGERO, Marcelo Macedo; TIRAPEGUI, Julio. Considerações sobre cromo, insulina e exercício físico. **Revista Brasileira Medicina do Esporte**, v. 11, n. 5, p. 262-266, out, 2005.

GONZALEZ, Mário H, PELIZARO, Cláudia B. Pelizaro, ARAÚJO, Geórgia C. L. Araújo, NOGUEIRA, Ana Rita A. Nogueira. Avaliação de diferentes raízes de plantas na adsorção de cromo e chumbo. In: CONGRESSO NACIONAL DE QUÍMICA ANALÍTICA, 12., 2003, São Luís. **Anais** [...]. São Luís: UFMA, 2003.

GOVEIA, Danielle, **Desenvolvimento de novos procedimentos analíticos para diferenciação in situ de espécies lábeis e inertes em sistemas aquáticos e para especiação de Cu(II) e Pb(II) complexados com nanopartículas de sílica**. Tese (Doutorado) –Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, UNESP, Araraquara, SP, 2010.

GRAZIANO, Francisco; GAZZONI, Délcio Luiz; PEDROSO, Maria Thereza. **Agricultura: Fatos e Mitos: Fundamentos para um debate racional sobre o Agro Brasileiro**. São Paulo: Editora Baraúna, 2020.

HAMMES, K.; SMERNIK, R. J.; SKJEMSTAD, J. O.; HERZOG, A.; VOGT, U. F.; SCHMIDT, M. W. I. Synthesis and characterisation of laboratory-charred grass straw

(*Oryza sativa*) and chestnut wood (*Castanea sativa*) as reference materials for black carbon quantification. **Organic Geochemistry**, Oxford, v. 37, n. 11, p. 1629-1633, 2006.

IBGE/SIDRA. **Sistema IBGE de Recuperação Automática** 2018. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa>. Acesso em: 8 set 2020.

IBP - Instituto Brasileiro Pellets Biomassa Briquete. **Biomassa**

**Agroindustrial**. Disponível em:

<<https://abibbrasil.wixsite.com/institutobrpellets/biomassa-agroindustrial>> Acesso em: 18 set 2020.

INFORME MINERAL DO ESTADO DE SÃO PAULO 2018 (ANO BASE 2017). São Paulo: Secretaria de Energia e Mineração, 2018. Disponível em: <http://dadosenergeticos.energia.sp.gov.br/portalsev2/Intranet/BiblioVirtual/Mineracao/cfem.pdf>. Acesso em: 14 set 2020.

KONZEN Egídio Arno; ALVARENGA Ramon Costa. Cultivo do milho. 4<sup>a</sup> ed. Sete Lagoas: EMBRAPA, Versão Eletrônica, set 2008. (Embrapa Milho e Sorgo Sistemas de Produção, 2). Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/491728/4/Adubacaoorganica.pdf>> Acesso em: 8 set 2020.

LOTI, L. B. S.; LISBOA M. H. M.; SILVA P. L.; DIAS V. E. C.; OLIVEIRA G. D.; MIRANDA G. H. B.; MARTINS G. S.; MONTEIRO C. R.; RODRIGUES L. F.; SPERANDIO V. G.; MENDES V. F.; LISBOA FILHO J. Informação geográfica voluntária como fonte de dados para cartografia básica de municípios de pequeno porte. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, **27.**; EXPOSICARTA, 26., 2017, Rio de Janeiro. Anais [...]. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, set. 2017. p. 1196-1200.

KALINKE, Cristiane. **Avaliação da potencialidade eletroanalítica de biochar, obtido em diferentes temperaturas, em eletrodos modificados para**

**determinação de espécies de interesse**, Dissertação(Mestrado em Química Analítica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2015.

LAGE JÚNIOR, Nelson Carvalho.**Influência das condições de pirólise na capacidade de adsorção de íons Pb(II) pelo biochar obtido da casca de pinhão (Araucária angustifolia)**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2016.

LEHMANN, J. Bio-energy in the black.**Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 5, n. 7, p. 381-387, 2007.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (eds.). **Biochar for Environmental Management: Science and Technology**.Earthscan: London & Sterling, 2009.

LEPSCH, Igor F.**Formação e conservação dos solos**. 2ª ed.São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

LUCON, Isabella Menuzzo. COSCIONE, Aline Renée. ANDRADE, Cristiano Alberto. **Finos de carvão e biocarvão de casca de eucalipto - impacto na fertilidade de solos tropicais**.Goiania: FERTBIO, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2016.

MACHADO, D.M. **Indicadores biológicos e dinâmica da matéria orgânica em Latossolo sob aplicação de biomassa carbonizada no leste de Mato Grosso**. Dissertação(Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - UFPI, Bom Jesus, PI, 2012.

MADARI, B. E.; COSTA, A. R.; CASTRO, L. M.; SANTOS, J. L.; BENITES, V. M.; ROCHA, A. O.; MACHADO, P. L. O. A. **Comunicado Técnico EMBRAPA 125**. EMBRAPA. Goiânia: Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão, 2006.

MAIA, Amanda Alves Domingos, GATTÁS, Pedro Luís de Lucca, DE MORAIS, Leandro Cardoso. Uso de resíduos industriais na descontaminação aquática: estudo cinético do Biocarvão da casca de laranja.**Revista Gestão Sustentável e Ambiente**, v. 6, n. 2, p. 368 - 384, 2017.

MAIA, Claudia Maria Branco de Freitas. **Produção de biocarvão a partir de diferentes fontes de biomassa.** In: ENCONTRO BRASILEIRO DE SUBSTÂNCIAS HÚMICAS, 9. 2011, Aracaju. **Anais [...].** Universidade Federal de Sergipe, Aracaju, SE, 2011.

MANFREDINI, Sidneide; DIAS, Sônia Maria Furian; NETO, José Pereira de Queiroz; OLIVEIRA, Déborh; FERREIRA, Rosely Dias Pacheco. Técnicas em Pedologia. In: VENTURI, Luis Antônio Bittar (org). **Praticando a Geografia: técnicas de campo e laboratório em geografia e análise ambiental.** São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

MARQUES, Jorge Soares. Ciência Geomorfológica. In: GUERRA; CUNHA, José Teixeira. (org). **Geomorfologia, uma atualização de bases e conceitos.** 2ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995.

MARTINELLI, Marcello. **Mapas, gráficos e redes: elabore você mesmo.** São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

MENDES, Dandara Camargo. **Obtenção pirolítica de biocarvão proveniente de resíduos do tabaco para aplicações agrícolas.** Trabalho de Graduação (Bacharel em Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Câmpus Experimental de Itapeva, Itapeva, 2019.

MECHI, Andréa; SANCHES, Djalma Luiz. Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo. **Estudos Avançados**, v. 24, n. 68, p. 209-220, 2010. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-40142010000100016&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142010000100016&lng=pt&nrm=iso)> Acesso em 20 set 2020.

MOREIRA, Maurício Alves. **Fundamentos de sensoriamento remoto e metodologias de aplicação.** 2ª ed. Viçosa: Editora UFV, 2003.

MUÑOZ, Suzana Inés Segura. **Impacto Ambiental na área do Aterro Sanitário e incinerador de resíduos sólidos de Ribeirão Preto, SP: Avaliação dos níveis de metais pesados.** Dissertação (Doutorado em Enfermagem em Saúde Pública) - Universidade de São Paulo - USP, Ribeirão Preto, 2002.

NETTO, Ana L. Coelho. Hidrologia de encosta na interface com a Geomorfologia. *In*: GUERRA; CUNHA, José Teixeira. (org). **Geomorfologia, uma atualização de bases e conceitos**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995.

NGUYEN, T. A. H. et al. Applicability of agricultural waste and by-products for adsorptive removal of heavy metals from wastewater. **Bioresource Technology**, v. 148, p. 574–585, 2013.

NOVAIS, Sara Vieira. **Biocarvão na mitigação de gases de efeito estufa e na remoção e reuso de fósforo**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrônoma) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – USP, Piracicaba, 2018.

OLIVEIRA, Déborah; GUERRA, Maria Daniely Freire. Compartimentos geomorfológicos do Estado de São Paulo e alguns solos representativos. **Boletim Paulista de Geografia**, n. 91, p. 89-98, 2011.

OLIVEIRA, P. A. V.; HIGARASHI, M. M. Unidade de compostagem para o tratamento dos dejetos de suínos. (Documentos 114) Embrapa Suínos e Aves, 2006. Disponível em: <[http://www.google.com.br/url?url=http://www.cnpsa.embrapa.br/download.php%3Ftipo%3Dpublicacoes%26cod\\_publicacao%3D918&rct=j&frm=1&q=&esrc=s&sa=U&ei=7vo3VZbrO8LQtQWMzYHYAw&ved=0CBQQFjAA&sig2=cxjjj82gco0erEf506fi6A&usg=AFQjCNE9Piotr3jnZSIRvf4tzdkXaQ6HQw](http://www.google.com.br/url?url=http://www.cnpsa.embrapa.br/download.php%3Ftipo%3Dpublicacoes%26cod_publicacao%3D918&rct=j&frm=1&q=&esrc=s&sa=U&ei=7vo3VZbrO8LQtQWMzYHYAw&ved=0CBQQFjAA&sig2=cxjjj82gco0erEf506fi6A&usg=AFQjCNE9Piotr3jnZSIRvf4tzdkXaQ6HQw)> Acesso em: 10 set 2020.

PEIXOTO, Carlos Augusto Brasil (org). **Geodiversidade do estado de são paulo – programa geodiversidade do Brasil** - CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL, SP 2010.

PETTER, Fabiano André; DE LIMA, Larissa Borges; MORALES, Marina Moura. MARIMON JÚNIOR, Ben Hur; DE MORAIS, Leidimar Alves. Biocarvão no solo: aspectos agrônômicos e ambientais. Ainfo EMBRAPA. INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE AGRICULTURE IN SINOP- BRAZIL. 2016, Sinop, MT. **Anais** [...]. Sinop, MT, 2016.

PIMENTEL-GOMES, Frederico, GARCIA, Carlos Henrique. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos**. Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, USP, 2002.

PRIMAZ, Carmem Tatiane. **Valorização de resíduos agroindustriais de café e algodão para produção de bio-óleo e biochar**. Tese(Doutorado) - Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2018.

PUGA, Aline Peregrina. **Biocarvão na mitigação da toxicidade de metais pesados em solos de área de mineração**. Tese(Doutorado em Agricultura Tropical e Subtropical) Instituto Agrônomo de Campinas, SP, 2015.

RESÍDUOS da avicultura viram matéria-prima de fertilizantes. **Avicultura Industrial**. Dez. 2019. Disponível em: <<https://www.aviculturaindustrial.com.br/imprensa/residuos-da-avicultura-viram-materia-prima-de-fertilizantes/20191230-173232-h555>> Acesso em: 12 set. 2020.

RIBEIRO, Helena; JAIME, Patrícia Constante; VENTURA, Deisy. Alimentação e sustentabilidade. **Estudos Avançados**, São Paulo , v. 31, n. 89, p. 185-198, Abr 2017 . Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-40142017000100185&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142017000100185&lng=en&nrm=iso)>. access on 26 Nov. 2020. <https://doi.org/10.1590/s0103-40142017.31890016>> Acesso em: 20 set 2020.

RONQUIM, Carlos Cesar. **Queimada na colheita de cana-de-açúcar: impactos ambientais, sociais e econômicos**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010.

ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, n. 8, p. 63-74, 1994.

ROSS, J.; MOROZ, I. Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 10, p. 41-58, nov. 2011.

RUIZ, João Álvaro. **Metodologia científica: guia para eficiência nos estudos**. 6ª ed. São Paulo: Editora Atlas, 2006.

SALAM, Abdus; BASHIR, Saqib; KHAN, Imran; HUSSAIN, Qaiser; GAO, Ruili; HU, Hongqing. Biochar induced Pb and Cu immobilization, phytoavailability attenuation in Chinese cabbage, and improved biochemical properties in naturally co-contaminated soil. **Journal of Soils and Sediments**, v.19, n.5, p.2381-2392, May 2019.

SCHENINI, Pedro Carlos. **Gerenciamento de resíduos da agroindústria**, II SIGERA, Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais. 2. 2011, Foz do Iguaçu. **Anais** [...]. Foz do Iguaçu, PR, mar, 2011. Volume I, Palestras.

SCHUMACHER, Mauro Valdir. Aspectos ambientais das plantações de Pinus e Eucaliptos, **Revista da Madeira**, REMADE, Edição N°77, Nov. 2003. Disponível em: <[http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira\\_materia.php?num=466&subject=Reflorestamento&title=Aspectos%20ambientais%20das%20planta%E7%F5es%20de%20Pinus%20e%20Eucaliptos#:~:text=No%20Brasil%20a%20implanta%C3%A7%C3%A3o%20de,de%20papel%2C%20celulose%2C%20chapas%2C](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=466&subject=Reflorestamento&title=Aspectos%20ambientais%20das%20planta%E7%F5es%20de%20Pinus%20e%20Eucaliptos#:~:text=No%20Brasil%20a%20implanta%C3%A7%C3%A3o%20de,de%20papel%2C%20celulose%2C%20chapas%2C)>, Acesso em 11 set 2020.

SCOT CONSULTORIA. **O que é feito com os resíduos gerados em seu confinamento?** Jan 2020. Disponível em: <<https://www.scotconsultoria.com.br/noticias/pecuaria-sustentavel/51971/o-que-e-feito-com-os-residuos-gerados-em-seu-confinamento?.htm>> Acesso em: 13 set 2020.

SEGATELLI, Ana; BOSCO, Tatiane; ARROBAS, Margarida; RODRIGUES, Manuel. Efeito do uso de condicionadores do solo na lixiviação de metais pesados. In: IBERO-AMERICAN CONGRESS ON ENTREPRENEURSHIP, ENERGY, ENVIRONMENT AND TECHNOLOGY, 5th. 2019, Portalegre. PT. **Anais[...]**. Portalegre, Portugal, 2019.

SIGRH: SISTEMA INTEGRADO DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS NO ESTADO DE SÃO PAULO. **Caracterização do Estado de São Paulo: Plano Estadual de Recursos Hídricos 2000/2003**. Disponível em: <<http://www.sigrh.sp.gov.br/arquivos/perh/r0estadual/capitulo01.htm>>. Acesso em: 15 set 2020.

SILVA, Ardemirio de Barros, **Sistemas de Informação Geo-referenciadas: conceitos e fundamentos**. Campinas: Editora Unicamp, 2003.

SILVA, Maria Ligia de Souza; VITTI, Godofredo Cesar; TREVIZAM, Anderson Ricardo. Concentração de metais pesados em grãos de plantas cultivadas em solo com diferentes níveis de contaminação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 4, p. 527-535, Brasília, 2007.

SIMÃO, J.B.P.; SIQUIERA, J.O., Solos contaminados por metais pesados: características, implicações e remediação. **Informe Agropecuário EMBRAPA**, Belo Horizonte, MG, v. 22, n. 210, p. 18-26, 2001.

SOARES, Marcio Roberto. **Coeficiente de distribuição ( $K_d$ ) de metais pesados no solo do Estado de São Paulo**. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2004.

SOUZA, Ana Kely Rufino; MORASSUTI, Claudio Yamamoto; DEUS, Warley Batista. Poluição do ambiente por metais pesados e utilização de vegetais como bioindicadores. **ACTA – Biomédica Brasiliense**, Brasília, DF, v.9, n. 3, p. 95-106, 2018.

SOUZA, Maria Celia Martins de. A produção de textéis de algodão orgânico: uma análise comparativa entre o subsistema orgânico e o sistema agroindustrial convencional. **Agricultura em São Paulo**, v. 47, n. 2, p. 83-104, 2002.

TOMAZ, Fabíola Domingues; SOUZA, Gabriel Vianna; SILVA JÚNIOR, Edson Ramos da; RIBEIRO, Abrahão Sousa. **Destinação e aproveitamento de resíduo florestal da colheita do eucalipto**. Congresso ABES / Fenasan 2017, São Paulo, SP, 2017.

THIES, Janice E.; RILLIG, Matthias C. Characteristics of Biochar: Biological Properties. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (eds.). **Biochar for Environmental Management: Science and Technology**. Earthscan: London & Sterling, 2009. 416p.

USP ESALQ – DIVISÃO DE COMUNICAÇÃO. Estudo compara uso de defensivos agrícolas por diferentes culturas. **Revista digital Campo & Negócios**, 03 mar 2020 Disponível em: <https://pipoca.esalq.usp.br/sistemas/webdvcomun/arquivos/03-03-estudo-compara-uso-de-defensivos-agricolas-por-diferentes-culturas-campo-negocios.pdf>, acesso em 10 set 2020.

VEGRO, C.L.R.; CARVALHO, F.C. Disponibilidade e utilização de resíduos gerados no processamento agroindustrial do café. **Instituto de Economia Agrícola. 1994**. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/ftp/iea/ie/1994/tec1-0194.pdf>> Acesso em: 12 set 2020.

VICENTINI, Dienyfer Luana Gabriel; OLIVEIRA, Jully; Gabriela Retzlaf de. Análise da gestão dos resíduos de avicultura e impactos ambientais no município de Leopoldina (PR), **Revista Geografia em Atos**, Presidente Prudente, n. 11, v. 04, p. 05-26, 2019.

WAYNE, Emily. Conquistadors, cannibals and climate change: A brief history of biochar. **Pro-Natura International**. Oxford: University, Oxford, 2012.

ZHAO, Hai-Tao ; MA, Shuai ; ZHENG, Sheng-Yang ; HAN, Shu-Wen ; YAO, Fen-Xia ; WANG, Xiao-Zhi ; WANG, Sheng-Sen ; FENG, Ke,  $\beta$ -cyclodextrin functionalized biochars as novel sorbents for high-performance of Pb removal, **Journal of Hazardous Materials**, v.362, p.206-213, January 2019.

## **9. BASE DE DADOS CARTOGRÁFICOS**

### **DataGeo Sistema Ambiental Paulista:**

Geomorfologia do Estado de São Paulo

[http://datageo.ambiente.sp.gov.br/serviceTranslator/rest/getXml/Geoserver\\_WMS/geomorfologiaestrutusp/1435155780729/wms](http://datageo.ambiente.sp.gov.br/serviceTranslator/rest/getXml/Geoserver_WMS/geomorfologiaestrutusp/1435155780729/wms)

ICTEM - Indicador de Coleta e Tratabilidade de Esgoto da População Urbana de Município em 2019

[http://datageo.ambiente.sp.gov.br/serviceTranslator/rest/getXml/Geoserver\\_Publico/VWM\\_ICTEM\\_CETESB\\_2019\\_POL/1593803728515/wms](http://datageo.ambiente.sp.gov.br/serviceTranslator/rest/getXml/Geoserver_Publico/VWM_ICTEM_CETESB_2019_POL/1593803728515/wms)

IQR – Índice de Qualidade de Aterros de Resíduos 2018

[http://datageo.ambiente.sp.gov.br/serviceTranslator/rest/getXml/Geoserver\\_Publico/VWM\\_IQR\\_CETESB\\_2018\\_POL/1566232688954/wms](http://datageo.ambiente.sp.gov.br/serviceTranslator/rest/getXml/Geoserver_Publico/VWM_IQR_CETESB_2018_POL/1566232688954/wms)

### **IAC: Instituto Agrônomo de São Paulo**

Mapa de solos do Estado de São Paulo – 2017

<https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutoflorestal/2017/09/mapa-pedologico-do-estado-de-sao-paulo-revisado-e-ampliado/>

### **IBGE: Geociências / organização do território**

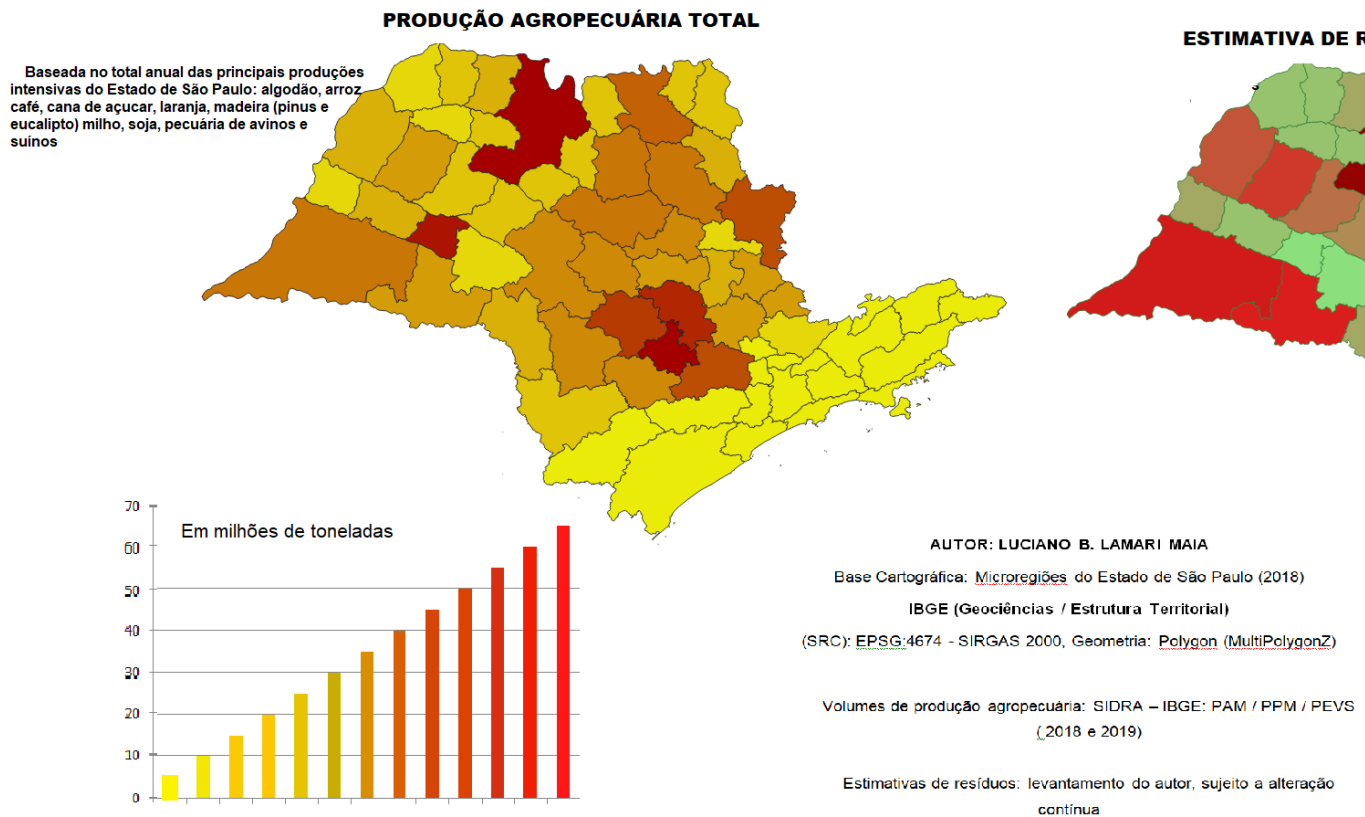
Micro-regiões administrativas estaduais

<https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>

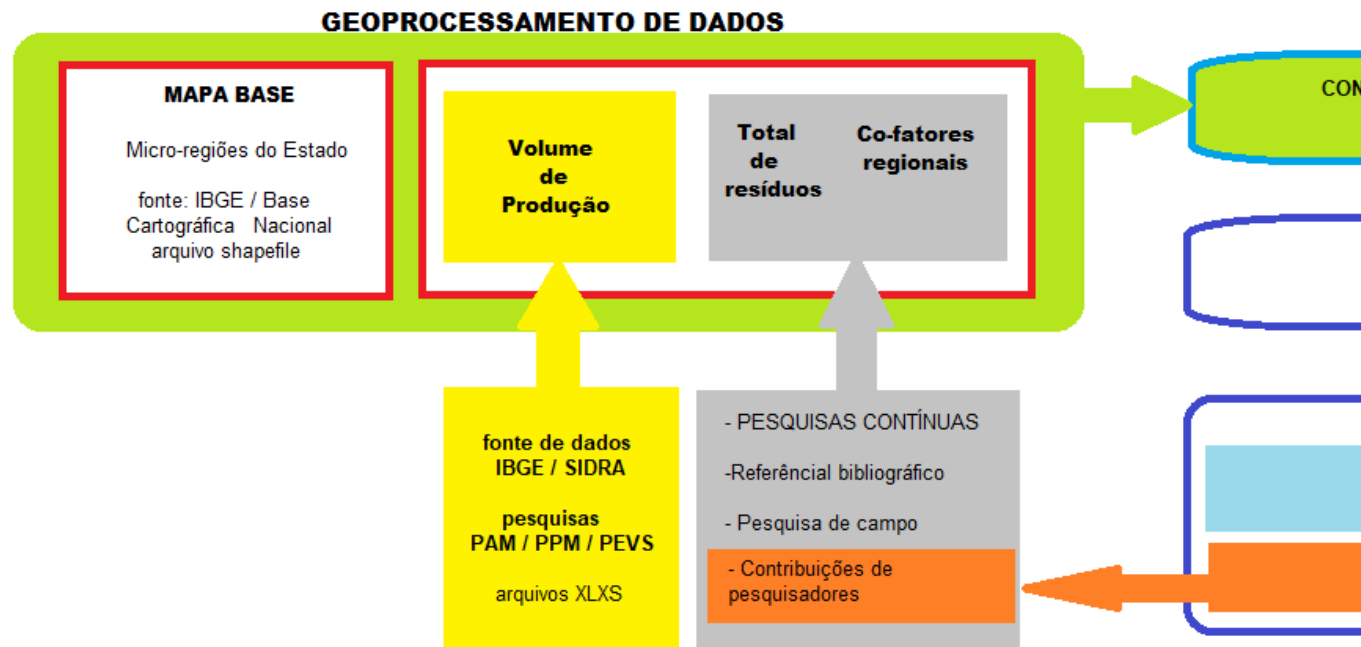
## **10. ANEXOS**

|                                                                                                                   |          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>MAPA 1 – RELAÇÃO ENTRE PRODUÇÃO AGROINDUSTRIAL E RESÍDUOS<br/>NÃO APROVEITADOS DO ESTADO DE SÃO PAULO.....</b> | <b>1</b> |
| <b>ARQUITETURA DO MAPA 1.....</b>                                                                                 | <b>2</b> |
| <b>MAPA 2 – POTENCIALIDADES DOS SOLOS PARA PROJETOS DE<br/>BIOCARVÃO.....</b>                                     | <b>3</b> |
| <b>SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS DO MAPA 2.....</b>                                                          | <b>4</b> |
| <b>ARQUITETURA DO MAPA 2.....</b>                                                                                 | <b>5</b> |
| <b>MAPA 3 – ÁREAS COM ALTO RISCO DE CONTAMINAÇÃO DO SOLO.....</b>                                                 | <b>6</b> |
| <b>ARQUITETURA DO MAPA 3.....</b>                                                                                 | <b>7</b> |

# MAPA 1 - RELAÇÃO ENTRE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA E RESÍDUOS NÃO APROVEITADOS

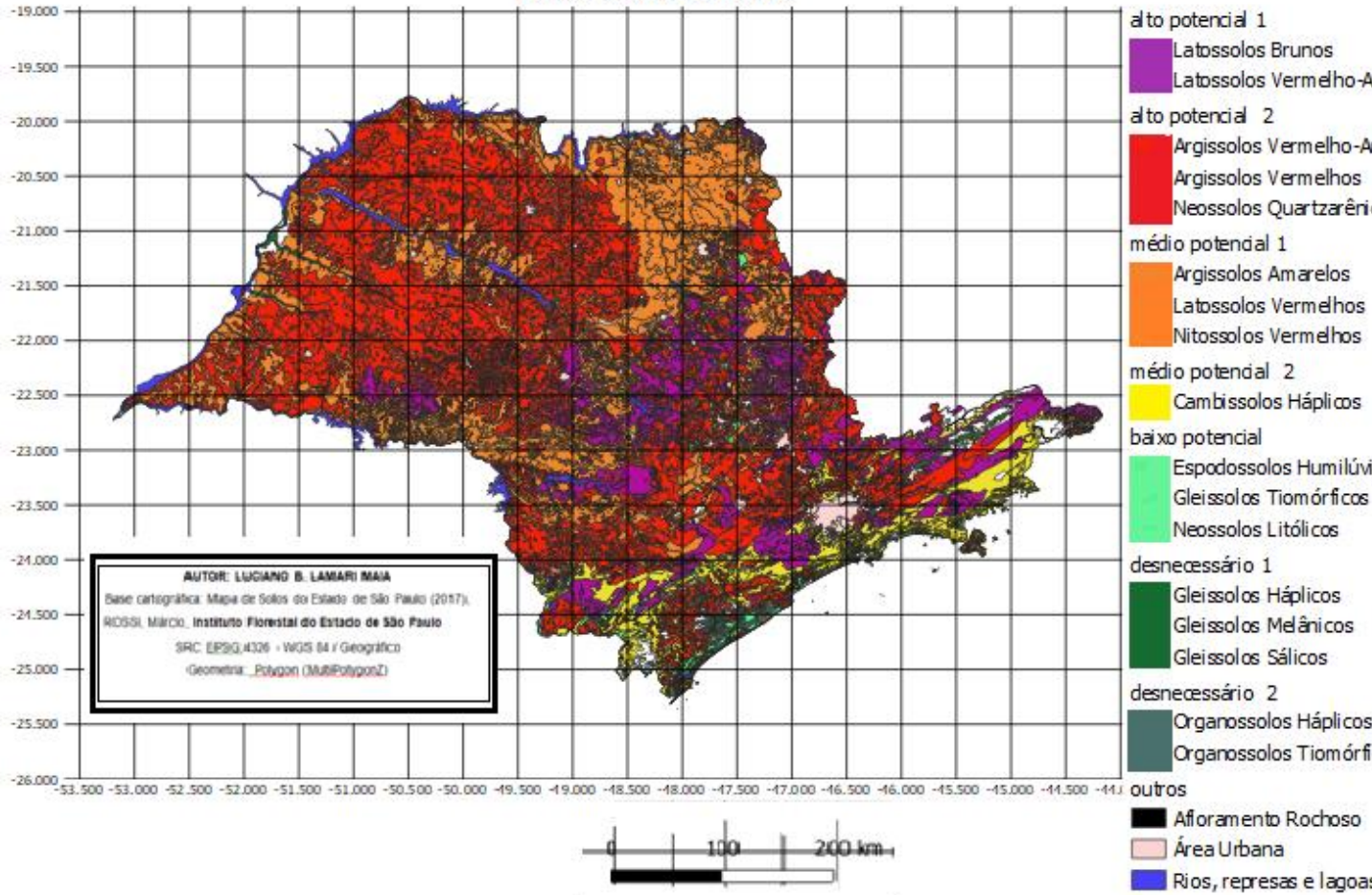


## MAPA 1 - Resíduos agro-industriais com potencial para conver



## MAPA 2 -Potencialidades dos solos para projetos de Biocarvão

Estado de São Paulo

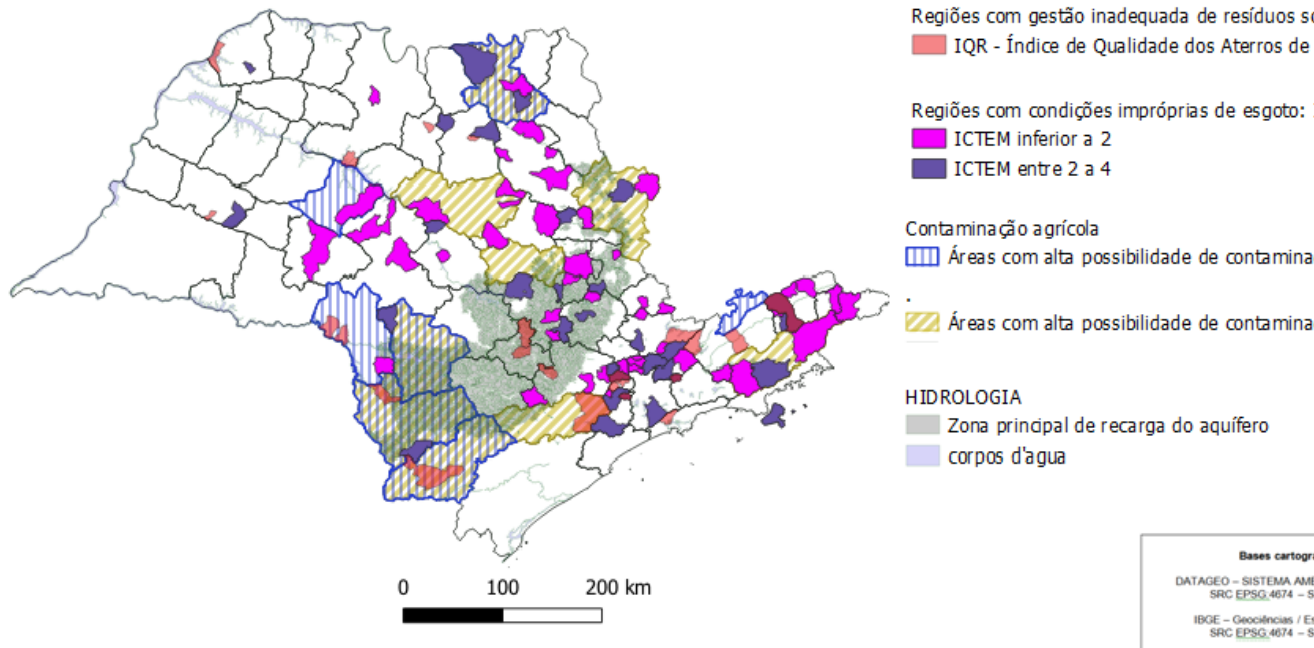


| POTENCIALIDADES DO BIÓTIPO                                                                                                                                        | PROPRIEDADES DOS SOLOS                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Alto potencial de aplicação do <b>biótipo</b> como insumo de propriedades físico-químicas                                                                         | <b>Alto potencial 3.</b><br>Solos com textura <b>1</b> , granulométrica média a arenosa, deficiência de nutrientes média a alta, pH ácido com baixa troca catiônica.                                         |
|                                                                                                                                                                   | <b>Alto potencial 2.</b><br>Solos com textura média arenosa, baixa retenção de água em camada superficial e deficiência de nutrientes minerais. Potencialidade agrícola quando aplicadas medidas corretivas. |
| Uso do <b>biótipo</b> como caráter preventivo e de manutenção das propriedades naturais ou para conservação de <b>biótipos</b> para solos de atividade microbiana | <b>Médio potencial 3.</b><br>Solos com boas potencialidades naturais para atividade agrícola                                                                                                                 |
|                                                                                                                                                                   | <b>Médio potencial 2.</b><br>Solos com média a boa fertilidade mineral. Textura <b>2-3</b> com problema de coesão, relevo acidentado e alto erosivo. Indicado a culturas perenes e/ou silvicultura.          |
| Aplicação do <b>biótipo</b> apenas recomendável em projetos de recomposição da flora nativa                                                                       | <b>Baixo potencial.</b><br>Zonas impróprias para atividades agrícolas por condições geomorfológicas desfavoráveis.                                                                                           |
| Baixa aplicabilidade do <b>biótipo</b> como insumo agrícola.                                                                                                      | <b>Desencasamento 3.</b><br>Solos com saturação hídrica, fertilidade natural variável, alto teor de matéria orgânica.                                                                                        |
|                                                                                                                                                                   | <b>Desencasamento 2.</b><br>Solos com saturação hídrica, fertilidade natural variável, alto teor de matéria orgânica. Possível aplicação como corretor de pH de longo prazo.                                 |

**MAPA 2 - Potencial dos solos para projetos de Biocarvão**

### MAPA 3 - Áreas com alto risco de contaminações de solo

Estado de São Paulo



### MAPA 3 - Áreas com potencial contaminação de solos

