

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

CLAUDIA SCOTON ANTONIO MARQUES

**CONCEPÇÃO DA REDE LOGÍSTICA REVERSA PARA A RECUPERAÇÃO DE
LIXO ELETROELETRÔNICO (EE-LIXO) COM APOIO DA LÓGICA *FUZZY***

Ilha Solteira
2017

CLAUDIA SCOTON ANTONIO MARQUES

**CONCEPÇÃO DA REDE LOGÍSTICA REVERSA PARA
RECUPERAÇÃO DE LIXO ELETROELETRÔNICO (EE-LIXO) COM
APOIO DA LÓGICA *FUZZY***

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do
Campus de Ilha Solteira - UNESP, como parte
dos requisitos para obtenção do título de Doutora
em Engenharia Elétrica. Área de conhecimento:
Automação

Prof. Dr. CARLOS ROBERTO MINUSSI
Orientador

Ilha Solteira
2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

M357c Marques, Claudia Scoton Antonio.
Concepção da rede logística reversa para a recuperação de lixo
eletroeletrônico (ee-lixo) com apoio da lógica fuzzy / Claudia Scoton Antonio
Marques. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2017
157 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia.
Área de conhecimento: Automação, 2017

Orientador: Carlos Roberto Minussi
Inclui bibliografia

1. Resíduos eletroeletrônicos. 2. Lógica Fuzzy. 3. Logística reversa.
4. Processo de análise hierárquica. 5. Sistema de informação geográfica.

CRB 8 4740

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

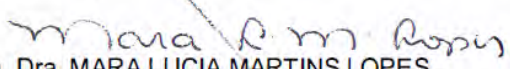
TÍTULO DA TESE: Concepção da Rede Logística Reversa para a Recuperação de "Lixo Eletroeletrônico" (ee-lixo) com apoio da Lógica *Fuzzy*

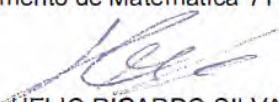
AUTORA: CLAUDIA SCOTON ANTONIO MARQUES

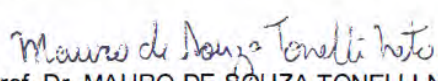
ORIENTADOR: CARLOS ROBERTO MINUSSI

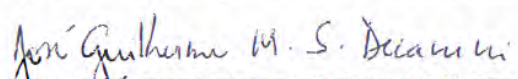
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: AUTOMAÇÃO pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. CARLOS ROBERTO MINUSSI
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Profa. Dra. MARA LUCIA MARTINS LOPES
Departamento de Matemática / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. HELIO RICARDO SILVA
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. MAURO DE SOUZA TONELLI NETO
Câmpus de Votuporanga / Instituto Federal de São Paulo


Prof. Dr. JOSÉ GUILHERME MAGALINI SANTOS DECANINI
Câmpus de Presidente Epitácio / Instituto Federal de São Paulo - IFSP

Ilha Solteira, 15 de setembro de 2017

DEDICO

Ao meu amado pai Tannus Antonio (in memoriam) e minha querida mãe Malene, que sempre acreditou em mim, sem nunca perder a fé, apesar das circunstâncias mostrarem o contrário.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente ao meu marido *Artur Pantoja Marques* pela companhia durante as noites mal dormidas, pelos fins de semana trabalhando e sem descanso, pelas horas intermináveis de ensinamento, pela paciência e por todo esforço para me auxiliar nessa caminhada, sem nunca reclamar e deixar de me apoiar. A minha filha *Paula A. Marques* que sempre esteve ao meu lado e nunca reclamou das minhas ausências, das minhas reclamações, obrigada pela paciência; amo muito você. Pelo eterno orgulho de nossa caminhada, pelo apoio, compreensão, ajuda, e, em especial, por todo carinho e amor ao longo deste percurso. Sem eles não seria possível chegar até aqui.

Meu enorme agradecimento Prof. Dr. Carlos Roberto Minussi, para mim foi uma imensa honra e orgulho tê-lo como meu orientador. Não esqueço seus ensinamentos, seus valiosos conselhos e sua confiança em mim. Muito obrigada!

Ao amigo Prof. Fabiano M. Tiossi, pela amizade, ajuda, disponibilidade, atenção, e por nunca me deixar desistir dessa caminhada!!!

Aos amigos, que sempre estiveram presentes nos momentos difíceis, mesmo sem saberem o quanto a presença deles foi importante, Adriana Ramos, Leida, Miriam, Sandra Medeiros, Onilda, Marleide, Regina Cubo e Kitty,

Aos amigos de trabalho da FUNEC especialmente ao Prof. Rogério Garcia e a Coordenadora Pedagógica Dra. Sâmira Ambar, que me proporcionaram, neste final, tempo para que eu pudesse finalizar esta pesquisa.

A minha mãe Malene, a minha irmã Adriana, meu irmão Maurício, minha prima Cristiane, aos meus familiares que sempre estiveram ao meu lado em todos os momentos.

Ao Departamento de Engenharia Elétrica da FEIS/UNESP por me permitir desenvolver esta pesquisa no departamento.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

“Nenhum dever é mais importante do que a gratidão”
Cícero.

“Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais
evidente fica nossa ignorância”.
(John F. Kennedy)

RESUMO

Os resíduos sólidos são considerados um dos maiores problemas ambientais do mundo e, consequentemente o gerenciamento destes resíduos também se tornaram um problema. Entre eles estão os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE). Dar um destino adequado ao REEE tornou-se essencial. A logística reversa, ou os canais reversos de distribuição, surgem como uma alternativa viável para isso. A redução da geração, o descarte correto desses resíduos e o reaproveitamento dos principais elementos recicláveis como insumo industrial devem ser prioridade de qualquer sistema de gerenciamento de resíduos seja público ou privado, para a preservação do meio ambiente e da saúde pública. Na presente pesquisa, o objetivo foi definir um modelo de rede reversa para REEE, buscando localizar as instalações de pontos de entrega voluntária (PEVs), o centro de triagem e o centro de tratamento, para que se alcance o menor custo de transporte. A metodologia desenvolvida ofereceu um modelo de localização com o suporte de um Sistema de Informação Geográfica (SIG), que permitiu a análise espacial dos dados, de um Processo de Análise Hierárquica (AHP) por meio do uso de conjunto de pesos para os critérios analisados e da comparação pareada, proporcionou grande flexibilidade no procedimento de agregação e da lógica *fuzzy*, considerada uma ferramenta eficiente para lidar com a incerteza e a subjetividade da rede reversa proposta. Estruturou-se a rede para um sistema logístico de coleta de REEE considerando o dimensionamento de muitas variáveis. Aplicou-se a rede em um município de pequeno porte, analisando-se inúmeras variáveis, entre elas a geração de resíduos, a localização de instalações de tratamento e os PEVs. Enquanto o centro de tratamento localizou-se o mais distante possível das áreas urbanas, mas evitando áreas suscetíveis a danos ambientais; os PEVs tiveram de atender ao maior número de bairros, e a menor distância possível ao Centro de Triagem. Ao cruzar esses critérios, e com o uso do ferramental proposto, foi possível definir a melhor localização para os PEVs, para o centro de tratamento e calcular o custo da rede reversa proposta. Foram observados outros pontos que poderiam ainda ser alterados e analisados. Concluiu-se que a metodologia proposta atingiu o objetivo de apoiar o tomador de decisão na resolução do gerenciamento de resíduos e, também, que a rede pode ser adaptada a qualquer município de pequeno porte, ou a bairros de cidades de grande porte. As definições adequadas dos equipamentos da coleta da rede reversa são fundamentais para esta se manter e para que o sistema de gerenciamento de resíduos municipais seja economicamente, socialmente e ambientalmente viável.

Palavras-chave: REEE. Logística reversa. Lógica *Fuzzy*. AHP. Geotecnologia. Resíduos Sólidos.

ABSTRACT

Solid waste is considered one of the biggest environmental problems in the world and therefore the management of this waste has become a problem. These include waste electrical and electronic equipment (WEEE). Giving a proper destination to WEEE has become essential and reverse logistics, or reverse distribution channels, are emerging as a viable alternative to this. The reduction of generation, the correct disposal of this waste and the reuse of the main recyclable elements as an industrial input should be a priority of any public or private waste management system for the preservation of the environment and public health. In the present research, the objective was to define a reverse network model for WEEE, seeking to locate the facilities of voluntary delivery points, the sorting center and the Treatment Center, seeking the lowest cost of transportation. The developed methodology offered a localization model with the support of a Geographic Information System (GIS), which allowed the spatial analysis of the data, a Hierarchical Analysis Process (AHP) through the use of set of weights for the analyzed criteria and the paired comparison, provided great flexibility in the aggregation procedure and diffuse logic, considered an efficient tool to deal with the uncertainty and the subjectivity of the proposed reverse network. The network was structured for a logistic system of WEEE collection considering the sizing of many variables. The network was applied in a small municipality, analyzing several variables among them the generation of residues, the location of treatment facilities and the collectors. While the treatment center was located as far away from urban areas as possible, but avoiding areas susceptible to environmental damage; the collectors had to attend to the largest number of neighborhoods, and the shortest possible distance to the Triage Center. By crossing these criteria, and with the use of the proposed tooling, it was possible to define the best location for the collector, the treatment center and calculate the proposed reverse network cost. There were other points that could still be changed and analyzed. It was concluded that the proposed methodology reached the objective of supporting the decision-maker in the resolution of waste management, and that the network can be adapted to any small municipality or to large city districts. The proper definition of the equipment of the collection of the reverse network are fundamental for this to be maintained and for the municipal waste management system to be economically, socially and environmentally viable.

Keywords: WEEE. Reverse Logistic. Fuzzy Logic. AHP. SIG. Solid waste

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de um Sistema de Resíduos	20
Figura 2 - Diagrama do Fluxo Básico da logística reversa	30
Figura 3 - Canais de distribuição diretos e reversos	31
Figura 4 - Estrutura da Rede de Logística Reversa	33
Figura 5 - Cadeia de recuperação de produtos	35
Figura 6 - Estrutura de um modelo genérico de rede de recuperação.	39
Figura 7 - Atividades da Logística Reversa de REEE	44
Figura 8 - Componentes do Sistema <i>Fuzzy</i>	48
Figura 9 - Exemplo da função <i>crisp</i>	50
Figura 10 - Exemplo de função <i>fuzzy</i>	49
Figura 11 - Função Trapezoidal	50
Figura 12 - Variáveis linguísticas para funções de pertinência	50
Figura 13 - Aplicação do Operador <i>fuzzy</i> OR.....	53
Figura 14 - Exemplo de aplicação do método de inferência	54
Figura 15 - Função Triangular	55
Figura 16 - Função Trapezoidal	56
Figura 17 - Função Senoidal	56
Figura 18 - Agregação	57
Figura 19 - Defuzzificação.....	58
Figura 20 - Diagrama de inferência <i>Fuzzy</i>	59
Figura 21 - Exemplo de hierarquia de critérios	63
Figura 22 - Etapas para seleção de localização de aterros, centros de tratamento e triagem.....	64
Figura 23 - Definições de SIG	71
Figura 24 - Ordenação lógica das camadas para visualização do conteúdo geral do mapa	72
Figura 25 - Representação de um mapa do mundo real via estrutura matricial ou <i>raster</i>	74
Figura 26 - Representação de um mapa do mundo real por meio de estrutura vetorial	74
Figura 27 - Representações em <i>raster</i> , vetor e mundo real	74
Figura 28 - Ciclo do SIG	75
Figura 29 - Fluxograma da pesquisa	81
Figura 30 - Rede de reciclagem de REEE de um sistema de logística reversa.....	83
Figura 31 - Fluxograma para definição dos PEVs	86
Figura 32 - Fluxograma para definição do Centro de Tratamento	88
Figura 33 - Geração de REEE (Baseado em vendas).....	89
Figura 34 - Geração de REEE (Time Step).....	89
Figura 35 - Geração de REEE (Consumo e uso).....	90
Figura 36 - Linha de produtos foco do estudo.....	90
Figura 37 - Geração de REEE.....	91
Figura 38 - Localização do município a ser estudado no Estado de São Paulo.....	92
Figura 39 - Bairros e densidade demográfica	96
Figura 40 - Contorno dos Bairros	97
Figura 41 - Possíveis localizações dos PEVs	98
Figura 42 - Centro de Triagem (Cooperativa).....	100
Figura 43 - Centro de tratamento – 0.....	101
Figura 44 - Centro de tratamento – 1.....	101
Figura 45 - Centro de tratamento – 2.....	102
Figura 46 - Distâncias Euclidianas dos PEVs ao Centro de Triagem.....	104
Figura 47 - Distâncias Viárias dos PEVs ao Centro de Triagem.....	105
Figura 48 - Criação do Projeto C_REEE e inserção dos dados básicos.....	107
Figura 49 - Criação dos elementos de estudo em formato vetorial	108
Figura 50 - Retângulo envolvente da Área de estudo.....	108
Figura 51 - Conversão dos dados vetoriais em matriciais (<i>raster</i>).....	109
Figura 52 - Distância do centro de triagem “DIST_CTR”	110

Figura 53 - Distância dos centros de tratamento “DIST_CTS”	111
Figura 54 - Distância dos pontos de entrega voluntária “DIST_PEVs”	111
Figura 55 - Distância da malha viária “DIST_MALHA_VIARIA”	112
Figura 56 - Distância centroide dos setores “DIST_CENTROIDE_SETORES_BAIRROS”	112
Figura 57 - Distância do perímetro urbano “DIST_PERIMETRO_URBANO”	113
Figura 58 - <i>Fuzzificação</i>	114
Figura 59 - Função <i>Fuzzy</i>	114
Figura 60 - Mapa <i>Fuzzy</i> padrão de distância ao centro de triagem “FUZZY_DI_CTR”	115
Figura 61 - Mapa <i>Fuzzy</i> padrão da quantidade de REEE por setor “FUZZY_REEE_SB”	116
Figura 62 - Mapa <i>Fuzzy</i> padrão de distância de descarte “FUZZY_DI_CENTROIDE_SB”	117
Figura 63 - Mapa <i>Fuzzy</i> padrão de distância aos PEVs “FUZZY_DI_PEVs”	118
Figura 64 - Mapa <i>Fuzzy</i> padrão distância do perímetro urbano “FUZZY_D_PERIM_URBANO”	119
Figura 65 - Mapa <i>Fuzzy</i> padrão de distância da malha viária “FUZZY_DI_MALHA_VIARIA”	120
Figura 66 - Mapa <i>Fuzzy</i> padrão de distância dos centros de tratamento “FUZZY_DI_CTS”	121
Figura 67 - Critérios de ponderação para os PEVs	123
Figura 68 - PAH: Seleção dos mapas FUZZY, parâmetros PEVs	123
Figura 69 - Pesos dos parâmetros PEVs na matriz pareada e cálculo dos indicadores	124
Figura 70 - Resultado da Combinação Linear Ponderada (WLC) para matriz PEV	125
Figura 71 - Mapa <i>FUZZY</i> “PEV_AHP4” Resultado da Combinação Ponderada para matriz PEV	125
Figura 72 - Mapa com os locais adequados para os PEVs	126
Figura 73 - Mapa com os locais indicados para os PEVs	127
Figura 74 - AHP: Seleção dos mapas <i>FUZZY</i> , parâmetros CTS	128
Figura 75 - Critérios para localização do Centro de Tratamento	129
Figura 76 - Pesos dos parâmetros CTS na matriz pareada e cálculo dos indicadores PHA	130
Figura 77 - Resultado da Combinação Linear Ponderada (WLC) para matriz CTS	130
Figura 78 - Mapa <i>FUZZY</i> resultado da Combinação Linear Ponderada para matriz CTS	131
Figura 79 - Mapa com os locais adequados para os CTS	132
Figura 80 - Resultado final da rede reversa	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos Resíduos Sólidos.....	20
Tabela 2 – Escala de relativa importância de Saaty	65
Tabela 3 - Matriz de comparação (supondo que critério 1 domina o critério 2)	65
Tabela 4 - Matriz comparativa normalizada do grupo de critérios.....	65
Tabela 5 – Resultado da matriz comparativa normalizada.....	66
Tabela 6 – Cálculo do vetor Principal.....	66
Tabela 7 – Cálculo do Vetor Máximo	66
Tabela 8 - Tabela de índices de consistência aleatória (RI) (SAATY, 2005)	67
Tabela 9 – Resultado do Volume Médio Estimado para Ilha Solteira, SP	94
Tabela 10 - Diferentes pontos de recebimento	95
Tabela 11 - Custos - Ponto de Entrega Voluntária	95
Tabela 12 – Densidade demográfica do município	96
Tabela 13 – Possíveis localizações dos PEVs	98
Tabela 13 – Possíveis localizações dos PEVs (cont.).....	99
Tabela 14 – Distâncias euclidianas e viárias dos PEVs ao Centro de Triagem.....	103
Tabela 15 - Perímetro e áreas dos bairros	104
Tabela 16 – Escala de ponderação para combinações pareadas.....	122
Tabela 17 - Matriz de comparação PEVs	124
Tabela 18 - Matriz de comparação Centro Tratamento.....	129
Tabela 19 – Custo final da rede proposta	134
Tabela 20 – Planilha de Dados para custos	156

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABDI	- Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial;
ABINEE	- Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica;
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas;
AHP	- Processo Hierárquico Analítico;
CAD	- Desenho Assistido por Computador;
CDRs	- Canais de Distribuição Reversa;
CEMPRE	- Compromisso Empresarial para Reciclagem;
ee-lixo	- Lixo Eletroeletrônico
CLM	- <i>Council of Logistics Management</i> ;
FEAM	- Fundação Estadual do Meio Ambiente;
FUNASA	- Fundação Nacional de Saúde;
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;
IGGSP	- Instituto Geográfico e Geológico de São Paulo;
IGP-M	Índice Geral de Preços do Mercado
IPEA	- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada;
IPT	- Instituto de Pesquisa Tecnológica;
ISO	- <i>International Organization for Standardization</i> ;
MILP	- <i>Mixed Integer Linear Program</i> ;
MOLP	- Programação Linear Multiobjetivo;
ONU	- Organização das Nações Unidas;
OSM	- <i>Open Street Map</i> ;
PEVs	- Pontos de Entrega Voluntária;
PMISA	- Prefeitura Municipal de Ilha Solteira;
PNSB	- Plano Nacional de Saneamento Básico;
PR	Ponto de Recebimento
PRM	- <i>Product Recovery Management</i> ;
PNUMA	- Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente;
QGIS	- <i>Quantum Gis</i> ;
REEE	- Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos;
RoHS	- <i>Restriction of Certain Hazardous Substances</i> ;
RSU	- Resíduos Sólidos Urbanos;
SIG	- Sistema de Informação Geográfica;
TCDF	- Tribunal de Contas do Distrito Federal;
UTM	- Universal Transversa de Mercator.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
1.1	PROBLEMA DA PESQUISA.....	16
1.2	HIPÓTESE	16
1.3	OBJETIVO	17
1.4	JUSTIFICATIVA	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	GESTÃO INTEGRADA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS.....	19
2.2	RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS (REEE)	21
2.3	LEGISLAÇÃO	23
2.4	COLETA SELETIVA	24
2.5	REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS	25
3	LOGÍSTICA REVERSA	27
3.1	CONCEITUAÇÃO.....	27
3.2	OBJETIVOS E CARACTERÍSTICAS DA LOGÍSTICA REVERSA	31
3.3	REDE LOGÍSTICA PARA RECUPERAÇÃO DE PRODUTOS	32
3.4	MODELOS QUANTITATIVOS PARA REDE REVERSA	36
3.5	PROGRAMAÇÃO LINEAR MULTIOBJETIVO (MOFLP).....	37
3.6	MODELO GENÉRICO DE REDE DE RECUPERAÇÃO.....	39
3.7	MODELOS DE ANÁLISE OPERACIONAL OU TÁTICA COM A LOGÍSTICA REVERSA.....	42
3.8	REDE REVERSA PARA REEE.....	43
4	LÓGICA FUZZY	45
4.1	CONJUNTOS NEBULOSOS	46
4.2	SISTEMA FUZZY	47
4.3	BASE DE REGRAS.....	51
4.4	FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA	54
4.6	AGREGAÇÃO	57
4.7	DEFUZZIFICAÇÃO	58
4.8	ANÁLISE MULTICRITÉRIO	60
5	PROCESSO HIERÁRQUICO ANALÍTICO (PHA)	62
6	SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (GIS)	69
6.1	CONCEITUAÇÃO.....	69
6.2	DADOS GEOGRÁFICOS OU GEOESPACIAIS	73
6.3	IMPORTÂNCIA DO SIG	75
6.4	SIG E PHA	76
7	METODOLOGIA.....	78
7.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	78
7.2	DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA.....	79
7.3	PROPOSTA DA REDE REVERSA	82
7.4	DEFINIÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DOS PEVS E CENTRO DE TRATAMENTO.....	85
7.5	ESTIMATIVA DO VOLUME DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS.....	88
7.6	ESTIMATIVA DO DEMAIS PARÂMETROS DA REDE.....	91
8	APLICAÇÃO DA REDE REVERSA DE REEE PROPOSTA	92
8.1	LEVANTAMENTO DE DADOS	92
8.2	SISTEMA DE GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS DOMICILIARES DO MUNICÍPIO DE ILHA SOLTEIRA	92
8.3	LEVANTAMENTO DOS PARÂMETROS DA REDE	93

9	RESULTADOS	106
9.1	PROCEDIMENTO	106
10	CONCLUSÕES e SUGESTÕES	135
	REFERÊNCIAS.....	
	APÊNDICE A – DADOS PARA CÁLCULO DO CUSTO DA REDE PROPOSTA.....	
	APÊNDICE B – BASE DE DADOS DE REEE.....	

1 INTRODUÇÃO

Nessas últimas décadas, o acelerado desenvolvimento de novas tecnologias e de novos materiais, bem como a redução dos custos de embalagens, computadores, eletrodomésticos, carros entre outros, contribuíram para a geração de produtos com ciclos de vida útil cada vez mais curto e com uma clara tendência a descartabilidade, levando a um dos maiores problemas ambientais do planeta: os resíduos sólidos.

Confirma-se isso ao se analisar a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico- PNSB realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2010), que revelou que a produção diária de lixo era de 170.000 toneladas por dia. Em 2011, esse valor já havia crescido 7,6%, chegando a 183.000 toneladas por dia. Desse montante, o país reaproveita apenas 13% - cinco vezes menos do que os países desenvolvidos (COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM- CEMPRE, 2012). O país perde cerca de R\$ 8 bilhões por ano por deixar de reciclar os resíduos urbanos Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada- IPEA (2011).

Cidades de países ricos tendem a contribuir em níveis mais elevados para a geração de resíduos *per capita*. Um relatório do Banco Mundial sobre o Desenvolvimento revela que o incremento de 1% na população corresponde a um aumento de 1,04% na geração de lixo, e no caso de aumento de 1% da renda *per capita* a geração de resíduos será de 0,34% maior (ESTRADA, 2005). Mas, o Brasil já produz 1,152kg/hab./dia próximo a cidades da Europa que produzem 1,2 kg/hab/dia.

Os resíduos de equipamentos eletroeletrônico (REEE) também fazem parte deste contexto e são atualmente um dos maiores problemas ambientais no mundo, pois são os que mais crescem.

Os equipamentos eletroeletrônicos são todos aqueles produtos cujo funcionamento depende do uso da eletricidade. Incluem-se, também, os equipamentos para geração, transferência e medição de grandezas elétricas (UNIÃO EUROPEIA, 2003). Ao fim de sua vida útil, ou seja, após esgotadas todas as possibilidades de reparo, atualização ou reuso, serão considerados “lixo eletroeletrônico” (ee-lixo).

Segundo o relatório *Reciclando - Do lixo eletrônico a recursos*, divulgado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE- PNUMA, 2010), o mundo gera 40 milhões de toneladas de lixo eletroeletrônico por ano e, até 2020, esse número deve crescer entre 200% a 400%.

Grande parte do material usado para produzir um produto eletrônico contém substâncias tóxicas, que podem ter efeitos adversos sobre o meio ambiente, bem como em seres humanos e animais, quando não tratados de maneira adequada.

A recuperação e a eliminação de REEE é um grande desafio para a gestão de resíduos sólidos urbanos, pois é uma tarefa complexa, uma vez que é preciso gerir a quantidade e heterogeneidade dos materiais, bem como onde serão tratados e descartados. A escassez de locais e a elevação das distâncias percorridas para a destinação final dos resíduos são fatores também observados (WOLFER; SANDER; GOGOLL, 2011; OLIVEIRA, 2011).

A partir desse cenário, pode-se perceber a dimensão dos inúmeros problemas ambientais relacionados aos resíduos eletroeletrônicos no mundo. Porém, existem saídas para minimizar ou reduzir esses impactos. Entre elas, encontra-se a logística reversa (ROGERS; TIBBEN-LEMBKE, 1999; KRIKKE 1998; FLEISCHMANN, 1997; CLM, 1993; MIGUEZ, 2010; QIN; JI, 2010).

A logística reversa permite que produtos pós-consumo ou parte de seus componentes retornem ao ciclo produtivo por meio dos canais reversos de distribuição, ou seja, desmanche, reciclagem e reuso, (que constituem a principal preocupação do estudo da Logística Reversa) agregando-se valores a esses produtos ou, ainda, sejam enviados a destinos finais adequados (aterro sanitário ou incineração com recuperação de energia).

A concepção dessas redes reversas é um dos problemas mais importantes dentro do campo da logística reversa, pois a incerteza é inerente durante o processo de recuperação. Estruturar e planejar um sistema logístico de coleta de REEE é uma atividade complexa pois, além de ser preciso o dimensionamento de muitas variáveis, existe a incerteza que rege a geração de resíduos perigosos, os erros de estimativa em valores de parâmetros e a indefinição de objetivos de ordenamento e condicionantes. Outro importante problema de planejamento é localizar instalações de tratamento ou aterros. Enquanto tais instalações estão localizadas muito longe de áreas urbanas, que geram a maior parte do lixo eletrônico, os custos operacionais do transporte de resíduos tendem a aumentar. Por isso, há a necessidade de minimizar os custos de transporte.

Nesse contexto, ferramentas computacionais são importantes, pois permitem a maior precisão na tomada de decisão, viabilizando o planejamento e controle das atividades logísticas e facilitando o gerenciamento das atividades-chave da logística de reversa da rede reversa. Nesta pesquisa, foi utilizada a combinação de um *software* conhecido como Sistema de Informações Geográficas (SIG), uma ferramenta que permite manipular dados referenciados geograficamente para, a partir de análises espaciais, apoiar a tomada de decisão

(OLIVEIRA, 2011; WOLFER et al., 2011), o processo hierárquico analítico (PHA), que é uma técnica usada para analisar e apoiar decisões com múltiplos critérios e lógica *fuzzy* (ZADEH, 1965), que permite tratar as incertezas do processo decisório, combinando os critérios e analisando-os simultaneamente (QIN; JI; 2010; WANG; YIN; MA, 2008; WOLFER, et. al.; 2011).

Nesse sentido, o objetivo da presente pesquisa refere-se ao desenvolvimento de uma rede reversa (ambientalmente aceitável e economicamente viável) para recuperação dos REEE em um município de pequeno porte, por meio da determinação da localização de instalações de coleta e de tratamento, bem como o transporte desses materiais, a um custo mínimo.

1.1 PROBLEMA DA PESQUISA

Com as taxas de obsolescência em ascensão, uma questão importante que continua em busca de resposta é: o que pode ser feito com o ee-lixo, tanto do ponto de vista econômico e ambiental?

O volume desses resíduos tem aumentado por causa da diminuição do ciclo de vida desses produtos e, conseqüentemente, o descarte desenfreado, causando sérios danos ambientais, não só pelo volume, mas por conterem materiais que demoram muito tempo para se decompor, como o plástico, vidro e, principalmente, pelos metais pesados que os compõem, e são altamente prejudiciais à saúde humana. Além disso, faltam regras claras e locais apropriados para a deposição desses equipamentos.

Outro, porém, é que o município de pequeno porte (menores de 100000 habitantes, segundo IBGE, 2010) apresentam uma situação precária quanto a sua estrutura de coleta seletiva, muitas vezes encontram dificuldades para trabalhar, não encontram apoio da população e, ainda, possuem custos elevados de coleta e transporte. Ademais não coletam resíduos como vidro, óleo de cozinha e resíduos eletroeletrônicos. Possuem aterro sanitário, mas muitas vezes, sem um adequado controle; não possuem aterro para resíduos perigosos, parte fundamental para o bom funcionamento de uma rede reversa.

Diante do exposto e da preocupação crescente com a preservação dos recursos naturais, constata-se que o problema a ser estudado neste trabalho é a criação de uma rede de recuperação de resíduos eletroeletrônicos viável para as condições específicas de municípios de pequeno porte.

1.2 HIPÓTESE

A coleta e o transporte dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são responsáveis por uma substancial porcentagem do orçamento destinado a limpeza urbana nos municípios, podendo chegar a mais de 70%, dependendo da localização geográfica e do preço do combustível (OLIVEIRA, 2011). É uma atividade de custo elevado, cujo planejamento requer atenção. Por isso espera-se que, ao dimensionar uma rede reversa para os REEE, ela seja viável econômica e ambientalmente, além de buscar o uso eficiente dos recursos municipais para coleta, processamento e disposição.

1.3 OBJETIVO

O objetivo precípua desta pesquisa foi a determinação de uma rede logística reversa para recuperação de lixo eletroeletrônico (REEE) permitindo agregar valor ao bem retornado. E, assim, localizar as instalações de pontos de entrega voluntária (PEVs), centro de triagem e de tratamento com apoio de um SIG, de um processo de Análise Hierárquica (PHA) e da Lógica *Fuzzy*, para auxiliar o tomador de decisão no gerenciamento de resíduos em um município de pequeno porte.

1.3.1 Objetivos específicos

- Revisar bibliografia: resíduos eletrônicos, logística reversa, SIG, AHP e Lógica *Fuzzy*;
- Determinação da rede reversa para recuperação de REEE;
- Aplicação da rede no município de pequeno porte (Ilha Solteira, SP);
- Levantamento de dados: quantidade de REEE gerado pelo município, custo de transporte por km do município; e de possíveis locais para coleta, triagem e centro de tratamento;
- Definir a combinação dos critérios de avaliação – pesos dos critérios e subcritérios;
- Análise dos dados obtidos para definir a rede reversa de recuperação;
- Conclusões e sugestões.

1.4 JUSTIFICATIVA

Essa pesquisa se justifica uma vez que o aumento da produção de resíduos sólidos urbanos é um claro indicador do crescimento do uso de produtos descartáveis em várias partes do mundo. A popularização dos eletroeletrônicos, a rápida obsolescência dos modelos e a forte tendência ao consumismo criam a necessidade de substituição desses produtos.

À medida que novas tecnologias são disponibilizadas no mercado e aparelhos são substituídos com uma frequência cada vez maior, o volume de ee-lixo cresce rapidamente. O Brasil ocupa o primeiro lugar no *ranking* de descarte de computadores *per capita*, que chega a pouco mais de 0,5kg por pessoa por ano (PNUMA, 2010). Segundo o diagnóstico feito pelo FEAM (2009), o Brasil gera em torno de 680 mil toneladas de Resíduos Eletroeletrônicos (REEE) e, até 2030, terá sido acumulado, aproximadamente, 22 milhões de toneladas de resíduos eletroeletrônicos para disposição. Segundo a ONU, em 2017, o volume de REEE no planeta deverá chegar a 48 milhões de toneladas.

O Brasil é o maior produtor *per capita* de resíduos eletrônicos entre os países emergentes, segundo o mais recente estudo da ONU sobre esse tema. O Brasil também foi cotado como o campeão em outro quesito: faltam dados e estudos sobre a situação da produção, reaproveitamento e reciclagem de eletrônicos: China, Índia, Argentina, Chile, Colômbia, Marrocos, África do Sul e até mesmo o México realizam e centralizam mais informações sobre a gestão de resíduos eletroeletrônicos em seus países. A falta de uma lei nacional sobre resíduos eletroeletrônicos é vista como um dos principais obstáculos para uma gestão eficiente do lixo eletrônico no país.

Confirma-se isso ao observar o volume de REEE produzido no município de São Paulo, 70.000ton/ano, em 2015, sendo que, apenas 2% vão para reciclagem, ou seja, 98% são descartados em aterros sanitários, afirmando o grande problema ambiental gerado pelo REEE (globo.com, 2015)

A redução da geração, o descarte correto de resíduos eletroeletrônicos e, o reaproveitamento dos principais elementos recicláveis (vidro, plástico e metal) como insumo industrial presentes neste tipo de resíduos, deve ser prioridade de qualquer sistema de gestão seja público ou privado, para a preservação do meio ambiente e da saúde pública (MATOS, 2012).

Basicamente, os REEE são recolhidos e transferidos para unidades de reciclagem. A distribuição espacial dos pontos de coleta, dos locais de processamento e o transporte desses resíduos devem ser igualmente considerados no modelo lógico adotado, buscando minimizar os custos e permitindo a viabilidade da rede.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 GESTÃO INTEGRADA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

O termo resíduo sólido corresponde ao que popularmente é chamado de “lixo”. A palavra lixo, segundo o Dicionário Eletrônico Houaiss 1.0 (2001) tem origem controversa ou mesmo obscura; há quem sugira o latim *lixa*, ‘cinza’ ou ‘água misturada com cinza’. Houaiss (2001) apresenta a seguinte definição para lixo: “qualquer objeto sem valor ou utilidade, ou detrito oriundo de trabalhos domésticos, industriais etc.” Porém, de acordo com a literatura estudada, o termo lixo já não é usado em ciência e tecnologia. Foi substituído por resíduos sólidos, de ampla aceitação; e conhecido em inglês como *solid waste*.

O gerenciamento integrado de resíduos sólidos é um conjunto articulado de ações normativas, operacionais, financeiras e de planejamento que uma administração municipal desenvolve (com base em critérios sanitários, ambientais e econômicos), para coletar, segregar, tratar e dispor o lixo de sua cidade (D’ALMEIDA; VILHENA, 2000). Assim, o gerenciamento depende de um conjunto de ações de curto, médio e longo prazo. Para cada ação existem várias alternativas, tanto em relação a locais de instalações do gerenciamento de resíduos sólidos, como aspectos técnico-operacionais (roteirização, sistema de coleta, sistema de triagem etc.) (MARQUES, 2004a).

O aproveitamento dos resíduos pode ser considerado como uma alternativa econômica, social e ambientalmente adequada, sendo que o gerenciamento adequado desses materiais pode reduzir os impactos da extração da matéria-prima, dar um destino adequado ao resíduo e minimizar os impactos ambientais das atividades produtivas

Durante os últimos anos, a legislação sobre resíduos tem evoluído e busca evitar sua disposição inadequada. Assim, a Associação Brasileira de Normas Técnicas- ABNT (2004) define resíduos sólidos como:

Resíduos nos estados sólidos e semissólidos, que resultam de atividades da comunidade de origem: urbana, agrícola, radioativa e outros (perigosos e/ou tóxicos). Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgoto ou corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis, em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004)

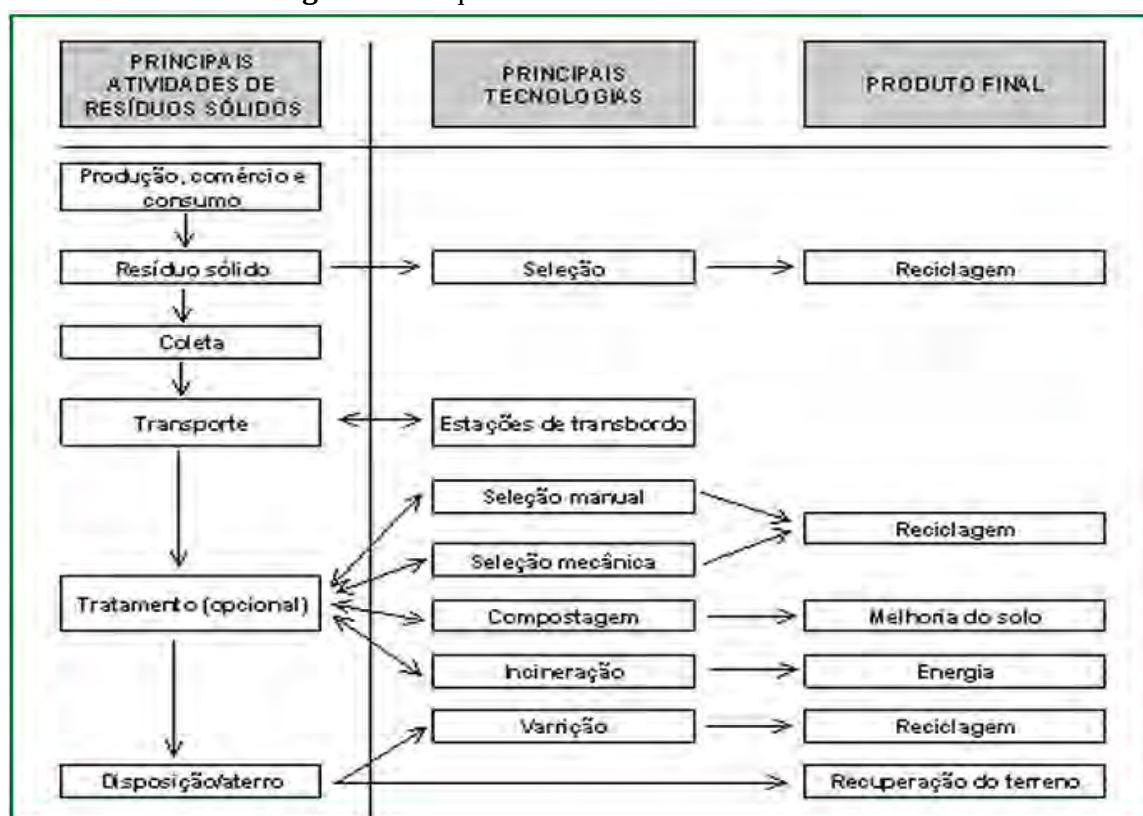
Na Tabela 1 apresenta-se a classificação dos Resíduos Sólidos de acordo com a ABNT, (2004).

Tabela 1 – Classificação dos Resíduos Sólidos

Classificação dos resíduos sólidos (ABNT 10.004/04)	
Quanto à natureza física	Secos Molhados
Quanto à composição química	Matéria orgânica Matéria inorgânica
Quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente	Resíduos Classe I – Perigosos Resíduos Classe II – Não perigosos Resíduos Classe II A – Não inertes - São os resíduos que podem apresentar características de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade, com possibilidade de acarretar riscos à saúde ou ao meio ambiente Resíduos Classe II B – Inertes -São aqueles que, por suas características intrínsecas, não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente.
Quanto à origem	Doméstico e comercial; Público; Resíduos Especiais; Construção Civil; Industriais; Agrícola e agrossilvopastoris; Cemiteriais Tecnológicos e perigosos; Pneumáticos

Fonte: Adaptado de ABNT (2004).

A secretaria do Meio Ambiente apresenta, por meio da Figura 1, o esquema de um sistema de gerenciamento de resíduos, a saber:

Figura 1 - Esquema de um Sistema de Resíduos

Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2011).

2.2 RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS (REEE)

Equipamentos eletroeletrônicos são todos aqueles produtos, cujo funcionamento depende do uso da eletricidade (Diretriz 2002/96/EC, 2003). Eles podem ser divididos em quatro categorias amplas (FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE- FEAM, 2009):

- Linha Branca: refrigeradores e congeladores, fogões, lavadoras de roupa e louça, secadoras, condicionadores de ar;
- Linha Marrom: monitores e televisores de tubo, plasma, LCD e LED, aparelhos de DVD e VHS, equipamentos de áudio, filmadoras;
- Linha Azul: batedeiras, liquidificadores, ferros elétricos, furadeiras, secadores de cabelo, espremedores de frutas, aspiradores de pó, cafeteiras;
- Linha Verde: computadores desktop e laptops, acessórios de informática, *tablets* e telefones celulares.

Ao fim de sua vida útil, esses produtos passam a ser considerados resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), ou simplesmente lixo eletroeletrônico (ee-lixo). Porém, só chegam a esse ponto uma vez esgotadas todas as possibilidades de reparo, atualização ou reuso.

Todo ano, segundo o PNUMA (2010), entre 20 e 50 milhões de toneladas de “lixo eletroeletrônico” são gerados por ano, e compreendem mais de 5% dos resíduos sólidos urbanos. Nos países desenvolvidos os REEE chegam a representar 1% dos resíduos sólidos gerados (PNUMA, 2010). A geração de REEE na União Europeia varia de 5 a 7 milhões de toneladas por ano, ou cerca de 14kg ou 15kg *per capita*. É esperado que cresça de 3% a 5% ao ano, três vezes mais rápido do que o crescimento da geração de resíduos anuais municipais. Em países em desenvolvimento, a geração de REEE é estimada entre 0,01% e 1% do total de resíduos sólidos urbanos gerados (FEAM, 2009).

Sob o ponto de vista ambiental, o lixo eletroeletrônico se configura em um grave problema, desde a sua produção até o seu descarte. Para serem produzidos, os computadores e outros aparelhos consomem uma enorme quantidade de recursos naturais, água e energia. Segundo Kuehr e Willians¹ (2003 apud MIGUEZ, 2010) para fazer um computador pessoal (PC) usa-se: 240kg de combustível fóssil (cerca de 9 vezes o peso do computador), 22 kg de produtos químicos e 1.500kg de água, 80% do consumo de energia está na sua fabricação, enquanto apenas 20% da energia são gastos durante o uso.

¹ KUEHR,R.; WILLIANS,E. Computers and environment – understanding and managing their impacts. Kluwer. Holanda: Academic Publishers. United Nations University, 2003

Porém, o pior fator de poluição do chamado ee-lixo é o seu conteúdo, pois é composto por mais de 60 elementos diferentes sendo alguns deles passíveis de reciclagem e reutilização como os plásticos e ferros. Há também os que agredem a saúde e o meio ambiente como cádmio, mercúrio, chumbo, berílio e vários outros elementos tóxicos etc (SINIS, 2011). Por isso, é considerado um resíduo perigoso e precisa de tratamento adequado, pois, se não for tratado e destinado da forma correta, pode causar sérios danos à saúde humana, bem como ao meio ambiente.

Segundo Miguez (2010), o relatório apresentado pelo Grupo de Ação Basel (*The Basel Action Network – BAN*) em 2005, 75% dos equipamentos de informática exportados para os países africanos eram lixo, ou seja, não era economicamente viável o seu reaproveitamento.

Em 1992, entrou em vigor a Convenção de Basileia que estabeleceu um meio de acabar com a destinação dos resíduos perigosos dos países industrializados, principalmente os pertencentes a OCDE (EUA, Canadá, Europa Ocidental, Japão), aos países em desenvolvimento como a África e o Haiti. Contudo, os Estados Unidos se recusaram a ratificar a Convenção da Basileia e, ironicamente, eles são os maiores produtores de lixo *per capita*, e pior continuam exportando seu lixo para os países menos desenvolvidos.

Existem outros marcos regulatórios em relação ao ee-lixo, entre eles a: *Waste Electrical and Electronic Equipment- WEEE*, desenvolvido pela União Europeia em 2003 com a finalidade de reduzir os níveis de lixo eletrônico descartado nos aterros, e fornece diretrizes para a recuperação e a reciclagem de produtos eletroeletrônicos; e *Restriction on the use of Hazardous Substances- RoHS* promulgada em 2004 e aplicada partir de 2006 para a substituição de algumas substâncias nos produtos eletroeletrônicos visando reduzir o impacto ambiental durante a deposição e a reciclagem. (LEITE, 2009; MIGUEZ, 2010)

Já no Brasil a PNRS, sancionada em agosto de 2010, direciona as ações dos Municípios quanto aos resíduos sólidos gerados em seu território. Introduz a responsabilidade compartilhada (fabricantes, revendedores, governo, consumidores e recicladores) e dá destaque a logística reversa, mas deixou uma lacuna para o tratamento dos resíduos sólidos especialmente do lixo eletrônico. Todas as medidas previstas na PNRS visam à prevenção ambiental e estão em consonância com os objetivos do desenvolvimento sustentável.

A logística reversa pode contribuir para isso. Ela poderá fornecer às organizações públicas ou privadas benefícios ambientais, sociais e financeiros, pois busca recuperar estes produtos e lhes agregar valor, por meio do reuso, reaproveitamento, reprocessamento, aproveitamento de partes e componentes, reciclagem e por fim, o descarte adequado.

2.3 LEGISLAÇÃO

Há muitos anos tenta-se vencer o desafio de proteger o meio ambiente das ações antrópicas. Pode-se verificar pela literatura estudada que os problemas ambientais, decorrentes das atividades humanas, agravaram-se, principalmente, a partir da Revolução Industrial, causados pela produção em grande escala. O homem igualmente começou a produzir freneticamente e, como consequência, a poluir na mesma escala.

Na década de 60, o conceito de desenvolvimento significava crescimento econômico. A poluição e a degradação ambiental eram vistas como consequências inevitáveis do processo de desenvolvimentos industrial e econômico (SCHALCH; LEITE, 2000).

Naquela época, o tema Meio Ambiente foi abordado pela primeira vez em um evento internacional, realizado por um grupo de cientistas reunidos no chamado Clube de Roma apresentaram o relatório *Limits to Growth* (Limites ao Crescimento), publicado em 1972, foi um sinal de alerta que incluía projeções e conscientizava a sociedade para os limites da exploração do planeta (VALLE, 1996).

Ainda em 1972, foi realizada, na cidade Estocolmo, a primeira conferência internacional sobre o meio ambiente, a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Humano, que reconheceu a qualidade ambiental como um direito humano e destacou a necessidade do uso sustentável dos recursos naturais (HARRINGTON; KNIGHT, 2001).

De acordo com Moreira (2001), a exploração do meio ambiente global pelos países desenvolvidos foi abordada em 1978 pela publicação *Ecologie et Politique*, de André Gorz, no qual se mostrava que os países ricos, com apenas 13% da população do planeta, consumiam metade da pesca mundial, utilizavam 20% das superfícies agrícolas, e alimentavam os seus animais com 2/3 da colheita mundial de soja.

Na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada em 1992 no Rio de Janeiro, firmou-se um documento de ação para as questões ambientais, a Agenda 21, onde foi proposta a redução da quantidade de energia e materiais utilizados na produção de bens e serviços, a utilização de tecnologias limpas e a promoção de pesquisas para o desenvolvimento de novas fontes de energia e de recursos naturais renováveis (LORA, 2000).

Ainda em 1992, entram em vigor as normas britânicas BS7750 — *Specification for Environmental Management Systems* (Especificação para Sistemas de Gestão Ambiental) que serviram de base para elaboração de um sistema de normas internacionais de gestão ambiental, denominada ISO 14000.

No Brasil, a legislação ambiental vem se aprimorando com o passar dos anos. Um

passo importante foi dado recentemente com a aprovação, após 20 anos, da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Ela abrange vários conceitos, entre eles a responsabilidade compartilhada, e a logística reversa.

A seguir, apresentam-se as principais legislações brasileiras sobre resíduos:

- **LEGISLAÇÃO FEDERAL**
 - Constituição Federal 1988;
 - Resolução CONAMA 283/01 – Dispõe sobre tratamento e destinação final dos resíduos dos serviços de saúde;
 - Resolução CONAMA 307/02 – Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil;
 - NBR 10.004/04 – Classificação dos Resíduos Sólidos;
 - Lei 11.107/05 – Normas Gerais de Contratação de Consórcios Públicos;
 - Decreto 6.017/07 – Regulamentação Normas Gerais de Contratação de Consórcios Públicos;
 - Lei 11.445/07 – Lei Nacional de Saneamento Básico;
 - Lei nº 9.795/99 – Dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências;
 - Decreto 7.217/10 – Regulamenta a Lei 11.445/07;
 - Lei 12.305/10 – Política Nacional de Resíduos Sólidos;
- **LEGISLAÇÃO ESTADUAL (São Paulo)**
 - Lei 7.750/92 – Política Estadual de Saneamento;
 - Lei 12.300/06 – Política Estadual de Resíduos Sólidos.

2.4 COLETA SELETIVA

A coleta seletiva busca selecionar os resíduos previamente separados pelos geradores, tendo em vista o reaproveitamento, diferente da coleta convencional, em que os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são coletadas misturadas. Se realizada de forma correta, possibilita várias opções de tratamento para os resíduos (OLIVEIRA, 2011).

Existem diversas maneiras de operar um sistema de coleta seletiva. Cada município deve avaliar aquele que melhor lhe convier. Muitas vezes, a combinação de diferentes metodologias poderá gerar os melhores resultados.

A coleta seletiva se refere à operação que compreende a coleta de porta em porta, tanto em domicílios como no comércio. Pode-se encontrar também a coleta seletiva nos chamados

Pontos de Entrega Voluntária (PEV). Ou seja, é a operação de recolhimento de diversos tipos de embalagens originadas do descarte voluntário em contêineres próximos a pontos de vendas de grande movimento ou praças. Pode ser remunerada, em certos casos para incentivar a reciclagem, sendo geralmente separados os quatro tipos de descartáveis: vidros, plásticos, papéis e latas. Pode existir também em locais específicos de coleta. A rigor, qualquer coleta que contenha uma prévia separação do material a ser disposto ou que seja dirigida a um material específico pode ser considerada “seletiva” (LIMA, 2002).

Ainda pelo lado social, a coleta seletiva mostra-se muito atraente, pois pode envolver catadores de lixo e gerar milhares de empregos por meio da criação de indústrias recicladoras e, também, por meio de cooperativas de catadores. Cria ainda, oportunidades para fortalecer organizações comunitárias como parcerias entre escolas, associações ecológicas, empresas, sucateiros etc.

Como desvantagens, a coleta seletiva apresenta (LEITE, 2009):

- ♦ elevado custo da coleta e transporte, pois necessita de veículos especiais. Por exemplo, no caso de coleta porta-a-porta, utiliza caminhões especiais que passam em dias diferentes dos da coleta convencional;
- ♦ necessidade de um centro de triagem, mesmo com a segregação na fonte, onde os recicláveis são separados por tipo.

2.5 REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS

Para que a reciclagem de um determinado resíduo seja viável, do ponto de vista financeiro, faz-se necessário uma análise dos custos e benefícios. Sendo assim, um material poderá ser recuperado, caso seu valor de venda tenha condições de concorrer com o valor de mercado de um material não recuperado ou, ainda, se os gastos com sua recuperação forem menores que os gastos com o transporte, tratamento e disposição final.

Segundo Bidone e Povinelli (1999), a reciclagem para recuperação de um resíduo depende dos seguintes fatores:

- ♦ proximidade da instalação de reprocessamento;
- ♦ custos de transporte dos resíduos;
- ♦ volume de resíduos disponíveis para o processamento;
- ♦ custos de estocagem do resíduo no ponto de geração ou fora do local de origem.

Esses fatores são de grande importância para as redes reversas, pois podem definir se há ou não mercado para determinados materiais.

De acordo com o CEMPRE/IPT (2008), a coleta seletiva apresenta um custo mais elevado quando comparada com a coleta convencional, mas a viabilidade de um sistema de coleta seletiva pode ser determinada por meio de uma análise de custo-benefício. Mas é importante observar que a análise custo-benefício não é o único indicador de viabilidade, uma vez que não leva em conta os benefícios sociais e ambientais decorrentes da reciclagem. Porém, destaca-se que do ponto de vista ambiental é uma das opções mais adequadas para promover a logística reversa dos RSU e a reciclagem (OLIVEIRA, 2011)

A partir da coleta seletiva de materiais e dos primeiros processamentos, os materiais seguem etapas com objetivos semelhantes, todavia com peculiaridades e tecnologias diferentes, em função de suas naturezas. Essas diferenciações e peculiaridades definirão as redes reversas que cada material deverá seguir. À medida que o processo logístico reverso de coleta e consolidação de materiais se realiza, observa-se que normalmente o último processador comercializará o material. O elo seguinte na cadeia reversa poderá ser uma indústria de reciclagem ou uma empresa que reintegrará o material ao ciclo produtivo ou ao mercado secundário. A reintegração dos materiais de pós-consumo ao ciclo produtivo é a última etapa dos canais de distribuição reversa. (KRIKKE; HARTEN; SCHUUR, 1999).

3 LOGÍSTICA REVERSA

Do ponto de vista logístico, a vida de um produto não termina com sua entrega ao cliente. Os produtos se tornam obsoletos, danificados, ou não funcionam e devem retornar ao seu ponto de origem para serem adequadamente reparados, reaproveitados ou reciclados, podendo, assim, estender sua vida. Essas opções podem significar benefícios ao meio ambiente.

Os materiais reciclados podem ser usados para criar novos produtos, voltando ao fluxo direto como matéria-prima secundária. Produtos com componentes modulares (como equipamentos eletrônicos, computadores) que podem ser reutilizados e/ou renovados terão seu preço mais baixo do que o mesmo produto feito pela primeira vez. Entretanto, o valor será substancialmente mais alto que itens que são vendidos para sucata ou reciclagem (STOCK² 1992, apud FLEISCHMANN, 2001).

3.1 CONCEITUAÇÃO

Os desenvolvimentos de novos produtos visando à redução do ciclo de vida, bem como as buscas por novas tecnologias, entre outros fatores, causam mudanças drásticas tanto no ambiente externo como interno das empresas. Esses fatores aumentam a necessidade das empresas de buscarem desenvolver novas estruturas e sistemas mais adaptáveis e eficientes para dar respostas a essas mudanças. A otimização do gerenciamento desses novos sistemas conduz as empresas a uma crescente variedade de tarefas para a logística, o que levou a um replanejamento da logística de distribuição, surgindo assim, a “Logística Reversa”.

Na década de 90, a Logística Reversa obteve reconhecimento tanto no campo de pesquisa como na prática. Nos países onde os conceitos da logística empresarial já eram mais disseminados, como na Europa, a Logística Reversa passou a ser utilizadas com maior intensidade. O *Council of Logistics Management* (CLM) publicou 2 estudos sobre Logística Reversa. O primeiro feito por Stock (1992, apud FLEISCHMANN, 2001) reconhecendo o campo da Logística Reversa como relevante para os negócios e para a sociedade em geral. Um ano mais tarde Kopicky et al. (1993) pedem atenção para a disciplina e prática da Logística Reversa, ressaltando a oportunidade para reuso e reciclagem. Nos últimos anos muitos outros estudos foram publicados, entre eles Rogers e Tibben-Lembke (1999) apresentam um amplo trabalho de coleta de práticas de negócios da Logística Reversa e dão

²STOCK, J.R. *Reverse Logistics Programs*. Illinois: Council of Logistics Management, 1992 apud FLEISCHMANN, M. *Quantitative Models for Reverse Logistics*. Springer, 2001.

especial atenção à experiência dos Estados Unidos, onde os autores realizaram um abrangente questionário. Vários outros trabalhos apresentam as características e gerenciamento da Logística Reversa para sistemas de remanufatura.

Encontrou-se, porém, o termo “Logística Reversa” usado com diferentes significados. Para exemplificar as diferentes conotações consideraram-se a seguir as definições de importantes publicações.

Em uma das primeiras publicações referentes à Logística Reversa pelo *Council of Logistics Management*, Stock (1992) relata que a Logística Reversa refere-se ao:

Termo frequentemente usado para identificar o papel da logística na reciclagem, disposição de resíduos, e gerenciamento de materiais perigosos; em uma perspectiva geral inclui todas as questões relacionadas às atividades logísticas que visam à redução na fonte, reciclagem, substituição de materiais, reuso de materiais e disposição final (STOCK, 1992, p.1, apud FLEISCHMANN, 2001).

Vários autores, em suas definições, referiram-se a diferentes critérios para delinear o campo da Logística Reversa. Kopicky et al. (1993) dão ênfase à redução de resíduos sólidos e localizam a Logística Reversa no contexto do gerenciamento ambiental; o que contrasta com a definição de Rogers e Tibben-Lembke (1999) porque parecem não incluir o fluxo de produtos novos retornados por motivos comerciais. Já Pholen e Farris (1992) referem-se à direção do fluxo de bens, relativo a sua posição na cadeia de suprimentos, e parece não incluir produtos retornados por outras partes para os produtores, assim como retorno de embalagens de varejistas.

Finalmente Rogers e Tibben-Lembke (1999) referem-se ao fluxo de bens que conduzem ao “*closed loop*” na cadeia de suprimentos. Mas, em sua definição, excluem fluxos de produtos usados para empresas de recuperação, como as empresas de remanufatura.

Inderfurth, Laan e Teunter (2000) afirmam que a Logística Reversa é o conjunto de ações que visam à reutilização de produtos e materiais. Slijkhuis (2000) explica que ela compreende todas as atividades enfocadas na redução, reutilização e reciclagem, ou seja, a gestão e distribuição dos resíduos sólidos.

As definições expostas não são iguais, mas todas se referem ao fluxo de bens retornados para o produtor. Assim, a definição mais completa e atual sobre Logística Reversa foi dada por Fleischmann (2001), que a definiu como:

Processo de planejamento, implantação e controle eficiente e eficaz do fluxo e armazenagem de bens secundários relacionados à informações opostas a tradicional direção da cadeia de suprimentos com a característica de recuperar valores ou destinar a apropriada disposição (FLEISCHMANN, 2001, p.6).

Essa definição, que se refere ao gerenciamento logístico de produtos recuperados e disposição final, é similar à definição de Rogers e Tibben-Lembke, (1999), pois incluiu outros fluxos que retornam para o ponto de origem, assim como produtos recuperados por outro produtor ou em uma cadeia alternativa de suprimento.

Independente do termo adotado para a logística reversa atividades presentes na logística direta como transporte, armazenagem, distribuição e gerenciamento de estoques estão presentes na logística reversa (LEITE, 2009).

O gerenciamento das operações que compõem o fluxo reverso faz parte da Administração da Recuperação de Produtos – *Product Recovery Management* (PRM). Para Thierry et al. (1995, p.117), PRM é definido com: “o gerenciamento de todos os produtos, componentes e materiais usados e descartados pelo qual uma empresa fabricante é responsável legalmente, contratualmente ou por qualquer outra maneira”.

Ainda para Thierry et al. (1995, p.117), algumas das atividades da PRM são, em parte, similares àquelas que ocorrem no caso de devoluções internas de itens defeituosos devido a processos de produção não confiáveis. No entanto, suas atividades devem assegurar a recuperação sustentável do meio ambiente. Assim, o objetivo da PRM é a recuperação, tanto quanto possível, de valor econômico e ecológico dos produtos, componentes e materiais.

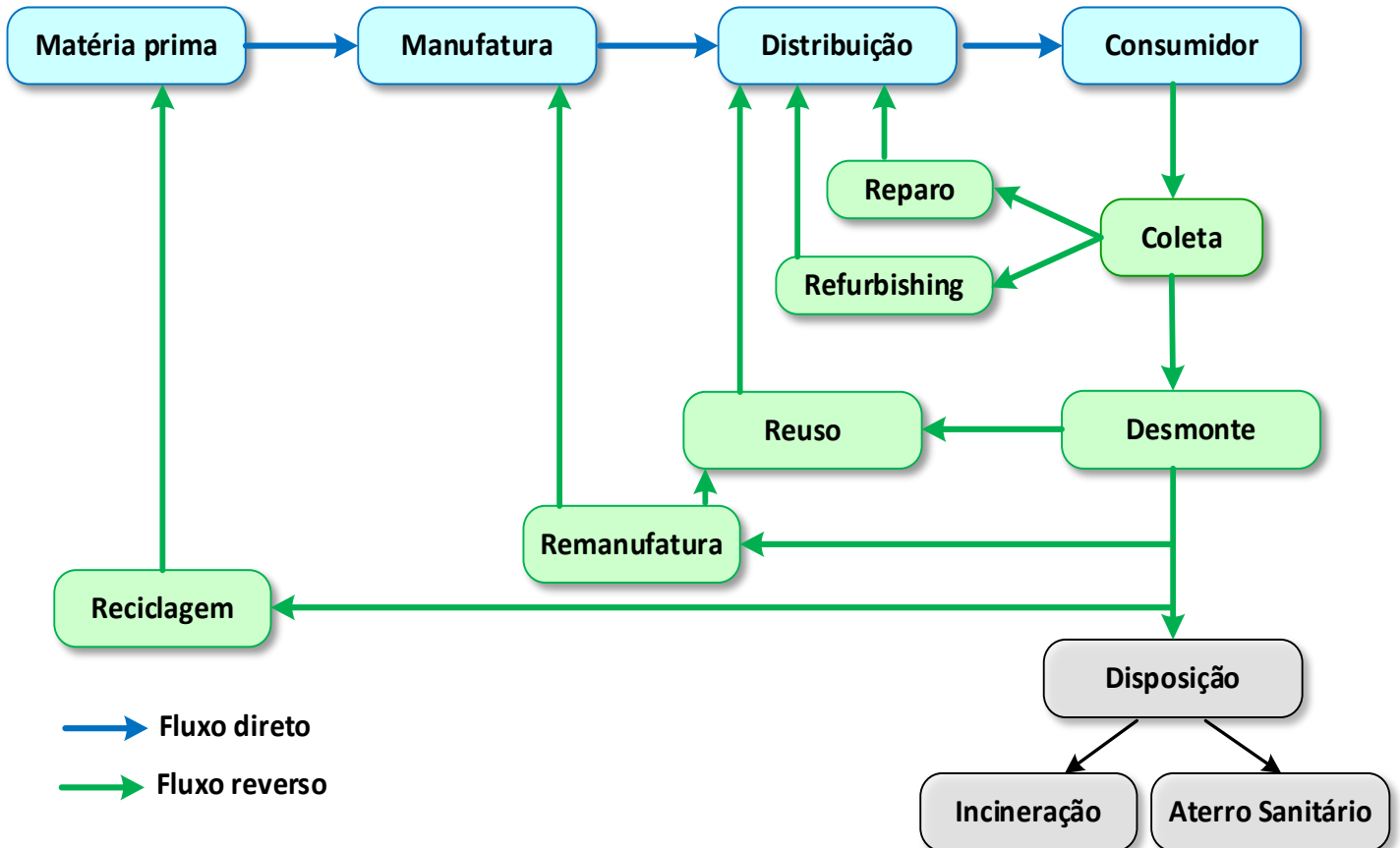
Outra importante contribuição foi dada por Carter e Ellram (1998, p.92), que ‘propuseram uma hierarquia para a Logística Reversa, na qual a redução de recursos deve ser o principal objetivo. Esta redução refere-se à minimização de materiais usados na produção do produto e à minimização dos resíduos e energia’. Por meio da redução de recursos, tanto o fluxo normal como o fluxo reverso de materiais seriam minimizados.

Dekker et al. (2004, p.16) definiram os processos de recuperação que poderiam ocorrer em diversos níveis da Logística Reversa, e acrescentaram, além dos processos propostos por Carter e Ellram (1998), outras opções de recuperação como reparo, *refurbishing* e remanufatura.

No processo de recuperação, reparo significa que o produto é retornado ao estado funcional após seu conserto. A qualidade do produto reparado é normalmente menor que a do produto novo. O processo de *Refurbishing* (Renovação) é quando o produto é atualizado pelo fabricante original para que atinja padrões de qualidade e operação similares ao produto original. E no processo de Remanufatura os produtos são completamente desmontados e todos os módulos e partes examinados em detalhe. Peças deterioradas são consertadas ou trocadas. O produto remanufaturado recebe uma avaliação de qualidade e são entregues ao produto sob

condições de garantia de produto novo. A Figura 2 mostra o diagrama de fluxo básico de atividades de logística reversa.

Figura 2 - Diagrama do Fluxo Básico da logística reversa



Fonte: Adaptado de Wang, Yin e Ma (2008).

Leite (2003), ao definir a logística reversa, a chamou de canais de distribuição reversa (CDRs) e a dividiu em duas categorias: retorno dos bens de pós-venda e de pós-consumo ao ciclo produtivo, ambos com o objetivo de agregar valor aos produtos descartados como: econômico, legal, logístico, de imagem. Os canais de distribuição reversa são:

♦ CDRs pós-consumo – são produtos originados no descarte de produtos após finalizada sua utilidade original e que podem retornar ao ciclo produtivo de alguma forma. Destacam-se 2 subsistemas:

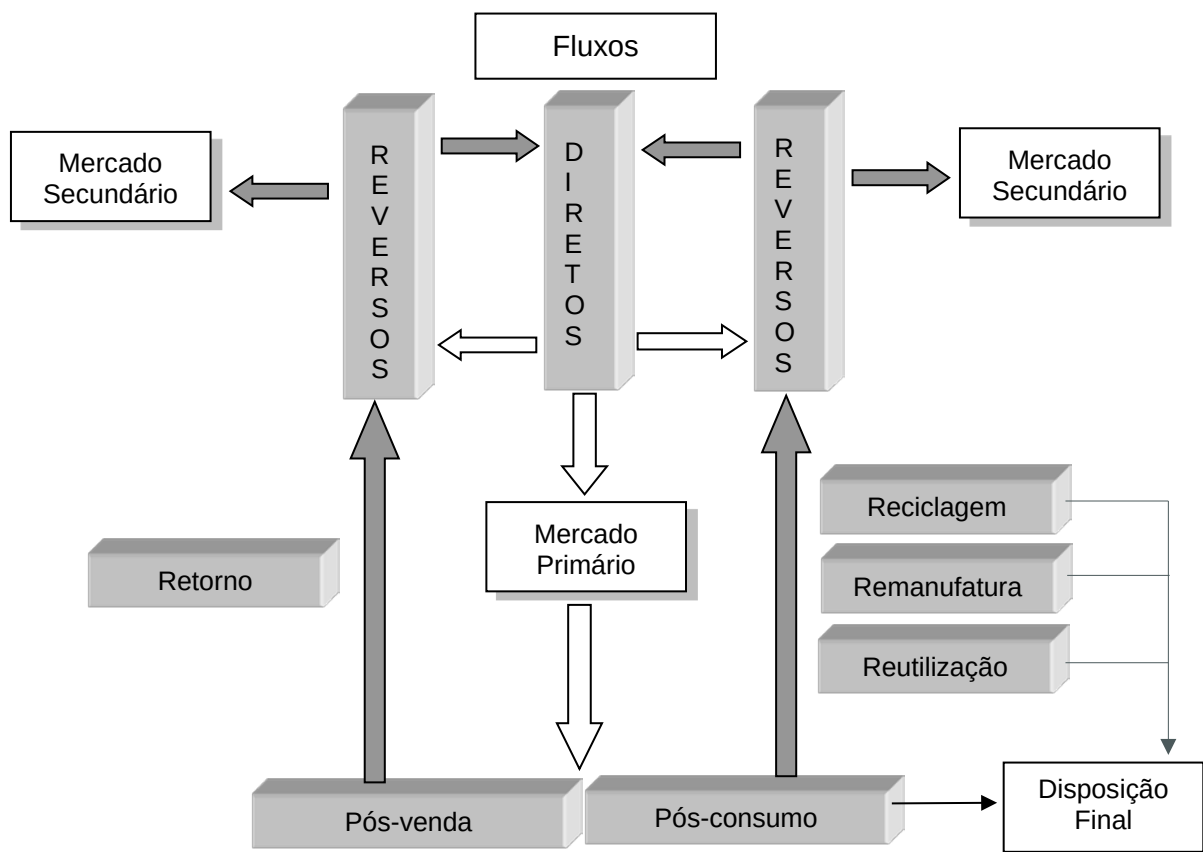
- Canais reversos de reciclagem,
- Canais reversos de reutilização.

E ainda algumas partes da destinação final de modo adequado.

♦ CDRs pós-venda – são constituídos pelas diferentes formas e possibilidades de retorno de uma parcela de produtos, com pouco ou nenhum uso que fluem no sentido inverso, motivados por problemas relacionados à qualidade em geral ou processos comerciais entre

empresas retornando ao ciclo de negócios de alguma maneira. Caracteriza-se pela reutilização ou a revenda como produto de segunda linha e/ou a reciclagem. Os fluxos gerais estão sintetizados na Figura 3:

Figura 3 – Canais de distribuição diretos e reversos



Fonte: Adaptado de Leite (2009).

Outros conceitos como Logística Verde, Logística Ambiental e Logística Ecológica, também são encontrados na literatura e, muitas vezes, geram dúvidas quando comparados com o termo “Logística Reversa”. Os três termos estão relacionados com a logística reversa, pois buscam a preservação dos recursos naturais e redução do impacto ambiental causado nas atividades produtivas das empresas, que estão relacionadas tanto ao fluxo direto quanto ao reverso, ou seja, incentiva a sustentabilidade em toda a cadeia de suprimentos (OLIVEIRA, 2011).

3.2 OBJETIVOS E CARACTERÍSTICAS DA LOGÍSTICA REVERSA

O objetivo principal da Logística Reversa é agregar valores econômicos, ecológicos e legais ao produto retornado, ou seja, tornar possível o retorno de bens ou de seus componentes ao ciclo produtivo. Tem como finalidade também, planejar redes reversas e

operar o fluxo reverso desde a coleta dos bens até a sua disposição final, seja para a reintegração do bem ao ciclo produtivo ou o descarte.

De acordo com Fleischmann (2001, p. 15), as atividades da Logística Reversa aumentam o fluxo de bens dos consumidores para os produtores. No gerenciamento deste fluxo, oposto ao fluxo convencional está a importância do campo da Logística Reversa.

Assim, para a rede reversa do lixo eletroeletrônico é necessário lembrar que é preciso que haja rentabilidade em todas as fases, a participação das organizações públicas e privadas e da sociedade para que a sustentabilidade do processo seja alcançada.

3.3. REDE LOGÍSTICA PARA RECUPERAÇÃO DE PRODUTOS

A Logística Reversa é uma relativamente nova no Brasil e, em muitos casos, novas redes logísticas precisam ser definidas. A infraestrutura das redes reversas precisa coletar os produtos usados, transportá-los para triagem e eventualmente encaminhá-los para outro uso ou reuso. Algumas questões a respeito disto precisam ficar claras como: qual o número de camadas na rede; o número e a localização de depósitos ou pontos intermediários; pontos de coleta; enfim a estrutura da rede reversa pode ser vista como o elo da integração entre a Logística Empresarial e Logística Reversa.

Fleischmann (2001) afirma que:

A etapa de retorno ou coleta caracteriza-se pela participação dos canais de retorno e passou a chamar a Logística Reversa de “Rede de Recuperação de Produtos”. A partir de então, o valor é adicionado ao produto e este se move do produtor (que recuperou o produto) para o usuário como na cadeia tradicional (FLEISCHMANN, 2001, p.46).

3.3.1 Tipos de redes de recuperação de produtos

As redes de recuperação apresentam alguns fatores discriminantes como a complexidade da rede e a incerteza quanto à quantidade e qualidade do material para recuperação na entrada do processo recuperação. Portanto, percebe-se que para uma organização compor a sua rede de recuperação é fundamental que ela conheça o tipo de produto a ser recuperado, sem esquecer é claro de definir os envolvidos e, principalmente, verificar se há mercado para o produto recuperado (THIERRY, 1995).

Fleischmann (2001, p. 52), baseado na forma de reprocessamento propôs os seguintes tipos de redes de recuperação:

♦ *Redes para itens reutilizáveis* - Embalagens, contêineres e PETs são itens típicos para reuso, pois podem ser reutilizados sem muito trabalho. Nos mercados industriais estes itens costumam ser trocados entre várias companhias;

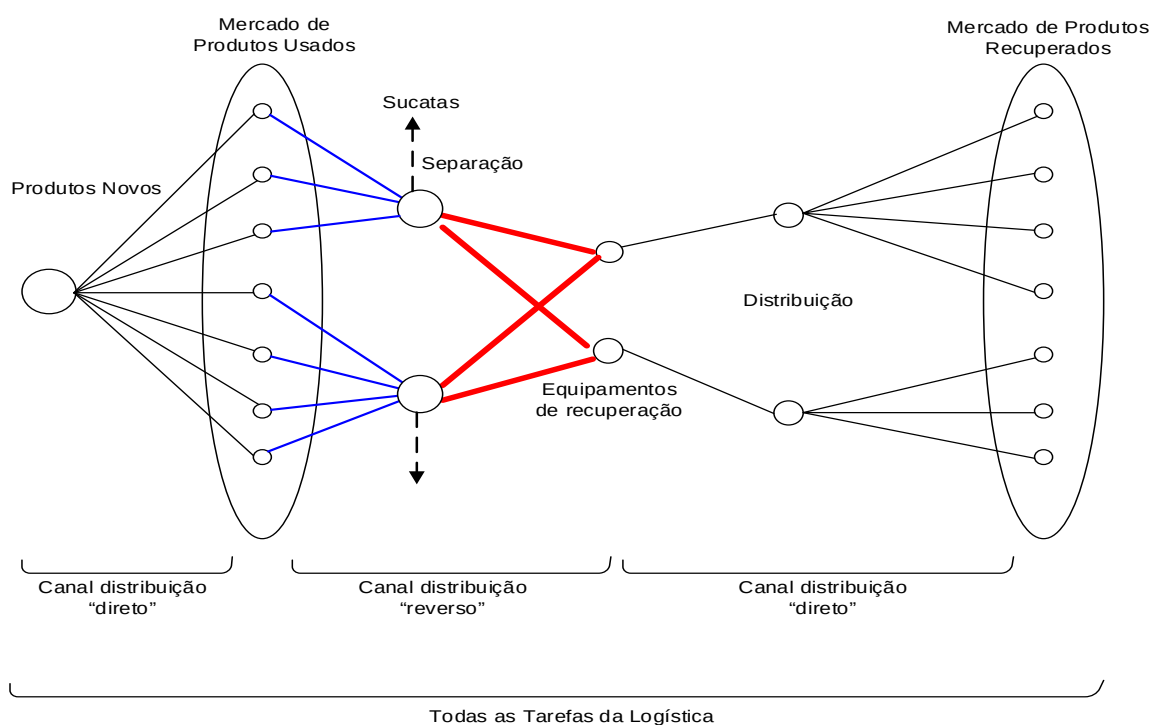
♦ *Redes para remanufatura de produtos* - a remanufatura geralmente é aplicada a equipamentos complexos ou maquinário com muitas partes. Normalmente, é uma atividade complexa que requer muitos testes. Adicionar valor ao produto recuperado é o principal direcionador econômico.

♦ *Redes para reciclagem de produtos*; de acordo com Steven (2004, p. 171), o tipo de material a ser reciclado, resíduos, embalagem e produtos usados definem o tipo de rede de reciclagem. O tratamento de resíduos e embalagens é apresentado no sistema de Logística Reversa em um planejamento horizontal porque esses materiais ocorrem em grande quantidade e com certa regularidade. Produtos usados, normalmente retornam de produtores depois de um longo período de uso e em quantidades irregulares.

Para esse autor as redes de recuperação de produtos podem ser estruturadas do seguinte modo:

- 1) Fase de coleta e aquisição – corresponde a parte convergente da Figura 4, isto é, o produto usado é disposto e coletado para a sua recuperação;
- 2) Fase de redistribuição – corresponde a parte divergente da Figura 4, ou seja, da recuperação de produtos para pontos de demandas no mercado de produtos recuperados;
- 3) Tipo de estrutura - Refere-se à estrutura da parte intermediária da rede que apresenta o processo de transformação do produto.

Figura 4 – Estrutura da Rede de Logística Reversa



Fonte: Adaptado de Fleischmann et al. (2001, p. 68).

3.3.2. Características gerais das redes para recuperação de produtos

A necessidade de implantar uma rede de recuperação de produtos pode surgir por causa da necessidade de se substituir, parcial ou integralmente, no processo de produção, materiais que eram normalmente extraídos da natureza. Esses materiais ou recursos secundários são resíduos, produtos usados ou componentes de produtos usados, que não são dispostos em aterros, mas são retornados para o mesmo processo ou para outro processo de produção.

Todas as redes vão de um mercado livre de produtos usados para outro mercado com demanda para produtos recuperados. Nesta transição, verificam-se os grupos de atividades que são comuns nas redes de recuperação de produtos:

1. **Coleta** – refere-se a todas as atividades para coletar produtos usados e transportá-los para algum ponto no qual receba tratamento. Em geral a coleta pode incluir compra, transporte e armazenagem.

2. **Inspeção e separação** – Operações que determinam quando um dado produto pode ser recuperado e em qual rede deve seguir. Assim, a inspeção e a separação resultam na divisão do fluxo de produtos usados de acordo com a distinção entre reuso, remanufatura ou disposição.

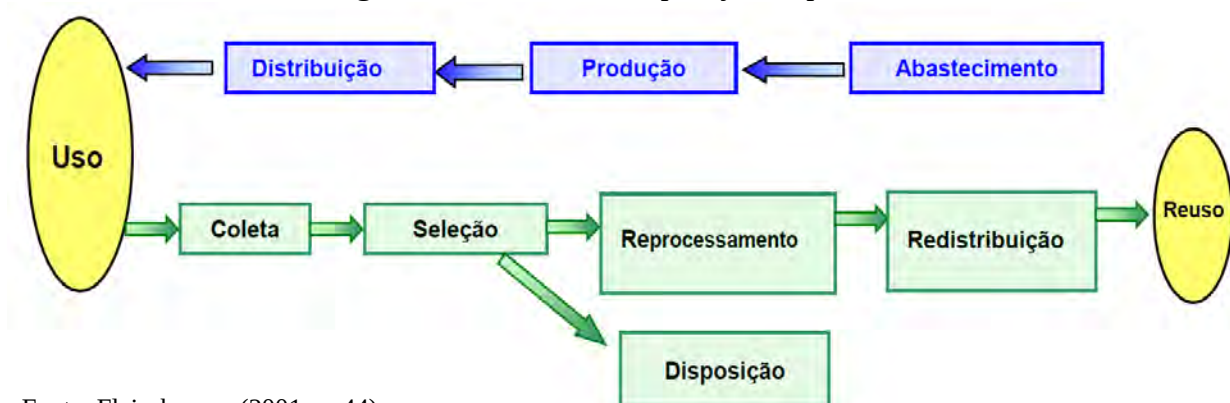
3. **Reprocessamento** – significa a transformação de um produto usado em um produto para uso novamente. Essa transformação pode ser feita de diferentes modos incluindo reciclagem, reparo e remanufatura. Atividades como limpeza, reposição, e remontagens podem também estar envolvidas;

4. **Disposição** – é usada quando produtos não podem ser recuperados por motivos técnicos ou por razões econômicas. Devem ir para disposição produtos rejeitados durante a separação, mas também produtos sem potencial de venda no mercado;

5. **Redistribuição** – refere-se a direcionar os produtos recuperados para um mercado potencial e também transportá-los aos futuros usuários. Isso pode incluir vendas, transportes e armazenagem.

Na Figura 5 mostra-se a representação gráfica das atividades em uma cadeia de recuperação de produtos, juntamente com uma cadeia tradicional de suprimentos.

Figura 5 - Cadeia de recuperação de produtos.



Fonte: Fleischmann (2001, p. 44).

Thierry et al. (1995) mostram que um alto nível de incerteza é característico no gerenciamento da rede de recuperação. A demanda para produtos e materiais recuperados é difícil prever em muitos casos, pois os mercados para produtos secundários ainda estão se estabelecendo. Outra importante colocação é a disponibilidade de produtos usados para recuperação no mercado.

Realizar planejamento de coleta e recuperação de produtos pode ser uma tarefa complicada, pois a forma de recuperação e a sequência do processo geralmente dependem da quantidade e da qualidade em que se encontra o produto no momento da entrada para o processo de recuperação.

Para Thierry et al. (1995), Fleischmann (2001, p. 51), as redes de recuperação de produtos envolvem centros de triagem, reprocessamento e empresas de gerenciamento de resíduos. As informações para o gerenciamento dessas redes podem ser classificadas em 4 categorias:

- ♦ **Informação sobre a característica do produto:** como mostrado anteriormente, as características físicas e econômicas do produto são interessantes tanto para descarte quanto para escolha da opção de recuperação. Num estudo realizado por Thierry et al. (1995) foram apresentadas 5 opções de níveis: reparo, renovação, remanufatura, reuso e reciclagem. Dependendo da opção escolhida, devem ser instalados na rede de Logística Reversa, equipamentos para recuperação e disposição;

- ♦ **Informação sobre a magnitude e a incerteza dos fluxos de retorno:** o retorno de produtos usados pelo fabricante pode ter várias motivações, como cumprimento de legislação ambiental, produtos com falha técnica dentro da garantia etc. A legislação pode impor responsabilidade ao produtor e, obrigá-lo a reciclagem. A disposição de um produto geralmente apresenta dúvidas. Portanto, o fabricante deve avaliar as expectativas de

quantidades esperadas, qualidade, localização e tempo de retorno para cada rede de recuperação;

♦ **Informações sobre mercados para produtos, componentes, e materiais recuperados:** deve-se avaliar os mercados potenciais para cada produto e as opções de recuperação. Produtos e materiais podem ser reusados pela própria empresa ou por outras empresas. Cada um destes agentes tem responsabilidades diferentes que influenciam no projeto da rede. Essas responsabilidades podem definir diferentes locais para a rede reversa. A incerteza aqui causa pesados danos no sistema da Logística Reversa;

♦ **Informação sobre equipamentos de recuperação de produto e operações de gerenciamento de resíduos:** envolvem equipamentos de recuperação e recursos humanos. Deve considerar quais as organizações envolvidas, quais os obstáculos, quais as quantidades de produtos processados (para cada recuperação de produto e opção de gerenciamento de resíduo), custos, rendimentos e impactos ambientais de todo o processo. Os aspectos relevantes são flexibilidade e custos. Um sistema universal pode ser mais flexível que um sistema especializado porque pode manejar mais tipos de produtos, mas também pode ser menos eficiente para alguns tipos de produtos.

3.4 MODELOS QUANTITATIVOS PARA REDE REVERSA

Fleischmann et al. (1997), classifica a logística reversa em três áreas principais: (1) o planejamento da distribuição, (2) controle de inventário dos fluxos de retorno, e (3) planejamento de produção com a reutilização de peças e materiais.

Embora haja uma quantidade crescente de pesquisas sobre logística reversa, estudos especificamente abordando problemas com ee-lixo são raros. Vários estudos encontrados na literatura apresentam como problemas na gestão do lixo eletrônico a localização das instalações de tratamento ou aterros sanitários, distribuição, modelos de rotas de veículos e de programação.

Os problemas de localização de estação de tratamento ou aterros sanitários normalmente enfrentam objetivos conflitantes, tais como custos e riscos, por isso é difícil de formular e resolver (QIN; JI, 2010; WANG; YIN; MA, 2008)

Segundo Wang, Yin e Ma (2008):

Se tais instalações estão localizadas muito longe de áreas urbanas que geram a maior parte do lixo eletrônico, os custos operacionais do transporte de resíduos tende a aumentar, por isso, há uma necessidade de minimizar os custos de transporte, que está em conflito com o objetivo inicial de localizar aterros longe de regiões de geração (WANG; YIN; MA, 2008, p. 473).

Na literatura encontram-se vários estudos sobre modelos quantitativos, entre eles: modelos de localização e distribuição, de roteirização. Notou-se que esta abordagem quantitativa pode ser dividida em nível tático ou operacional e estratégico.

Fleischmann (2001) apresentou três modelos referentes a configuração da rede logística reversa: Programação Estocástica, Aproximação contínua e Programação Linear Inteira Combinada (*MILP – Mixed Integer Linear Program*). Buscou-se na literatura pesquisas desenvolvidas na área de programação inteira.

3.5 PROGRAMAÇÃO LINEAR MULTIOBJETIVO (MOFLP)

A programação linear multiobjetivo- MOLP tem aplicações importantes em muitas áreas de engenharia e de gerenciamento. Geralmente, em um problema de programação linear multiobjetivo, as funções objetivo e os objetivos de restrição podem não estar bem definidos devido à falta de informação de dados e/ou situações de mercado incertas. Por esse motivo, os diferentes coeficientes e metas de restrição podem ser caracterizados por números difusos.

O problema do transporte, objeto deste estudo, pode ser formulado como um problema de programação linear. Na forma clássica, o problema do transporte minimiza o custo do transporte de algum produto disponível, pontos de coleta e destino precisam ser definidos. No entanto, na maioria dos problemas, a complexidade do ambiente econômico requer a consideração explícita de funções objetivas além do custo. Esses objetivos estão frequentemente em conflito, medido em diferentes escalas e difícil de combinar em uma função geral.

Na literatura, este modelo é muito usado em problemas de rede logística e se referem a modelos de localização de instalações baseados em MOLP.

Peirce e Davidson (1982), utilizaram um modelo de programação linear para formular o problema de otimização de roteamento de transporte entre as estações de transferência, aterros sanitários, e armazenamento de longo prazo. Aqui, são conhecidos os locais de tratamento e processamento são conhecidos. Por isso, o estudo limita-se à identificação das melhores rotas de distribuição dos resíduos.

A questão do transporte de vários tipos de resíduos é investigada em Jennings e Scholar (1984), que formula o sistema de gestão de resíduos perigosos regionais simplesmente como um problema de roteamento de veículos, na tentativa de cumprir a meta de custo mínimo.

Barros, Dekker e Scholten (1998) relataram o estudo de caso para projeto de redes de recuperação de produtos para reciclagem de areia de resíduos da construção civil nos Países

Baixos, realizado pelo sindicato das empresas de reciclagem de resíduos da construção civil. Segundo os autores, um milhão de toneladas/ano de areia costumam ir para aterros. Para reduzir a quantidade de resíduos e reduzir os custos de disposição os autores (*op. cit.*) definiram um modelo de localização de instalação capacitada multiformulada com um MILP.

Louwers et al. (1999), investigaram a logística reversa na recuperação de resíduos de carpetes. Segundo os autores, em 1996, a Europa Ocidental produziu 1,6 milhão de toneladas de resíduos de carpetes, que eram dispostos em aterros, ocupando espaço significativo. Considerados o grande volume de material, legislações ambientais mais restritivas, fonte de matéria prima de valor (fibras de nylon) e de combustível a indústria europeia de carpete estabeleceu uma rede de reciclagem em conjunto com as indústrias químicas. Realff, Ammins e Newton (1999) fizeram um estudo sobre carpetes nos EUA, e desenvolveram um modelo MILP para apoiar a tomada de decisão para a infraestrutura da rede reversa.

Ainda em 1999, Krikke, Van Harten e Schuur, desenvolveram um estudo de caso a respeito da implantação de um processo de remanufatura em uma empresa na Holanda. Com o objetivo de encontrar a solução ótima para a minimização de custos operacionais, formularam um modelo MILP e compararam com um número de soluções gerencias pré-selecionadas.

Quanto ao gerenciamento de resíduos eletroeletrônicos, um problema é localizar as instalações de tratamento ou os aterros sanitários. Esse problema geralmente enfrenta metas conflitantes, como custo e risco. Por isso é difícil formular e resolver. O caráter aleatório que governa a geração de resíduos perigosos, os erros de estimativa nos valores dos parâmetros e a imprecisão dos objetivos e restrições de planejamento são fontes de incerteza.

Jayaraman, Guide Junior e Srivastava (1999) analisaram a rede logística de uma companhia de remanufatura de equipamento eletrônico nos EUA. Suas atividades se referiam à coleta de produtos usados dos clientes, a remanufatura desses produtos e a sua distribuição. O modelo desenvolvido pelos autores (*op.cit.*) foi o MILP, para localização de armazéns para múltiplos produtos, e resolvido por otimização para diferentes cenários de suprimentos e demanda.

Fleishmann (2001) analisou o modelo de localização por MOFLP encontrados na literatura, entre eles alguns apresentados acima, e concluiu que este modelo surgiu como início das abordagens em relação à rede reversa.

Shih (2001) desenvolveu um sistema de logística reversa para a reciclagem de computadores em Taiwan.

Apesar dos avanços observados na literatura, a logística reversa de resíduos eletrônicos ainda tem muito a crescer. A variedade de características dos materiais de resíduos

eletroeletrônicos, juntamente com diversas regulamentações ambientais, tornou os problemas de tratamento desses resíduos complexos, exigindo medidas de solução específicas, como controle e gerenciamento de logística reversa.

3.6 MODELO GENÉRICO DE REDE DE RECUPERAÇÃO

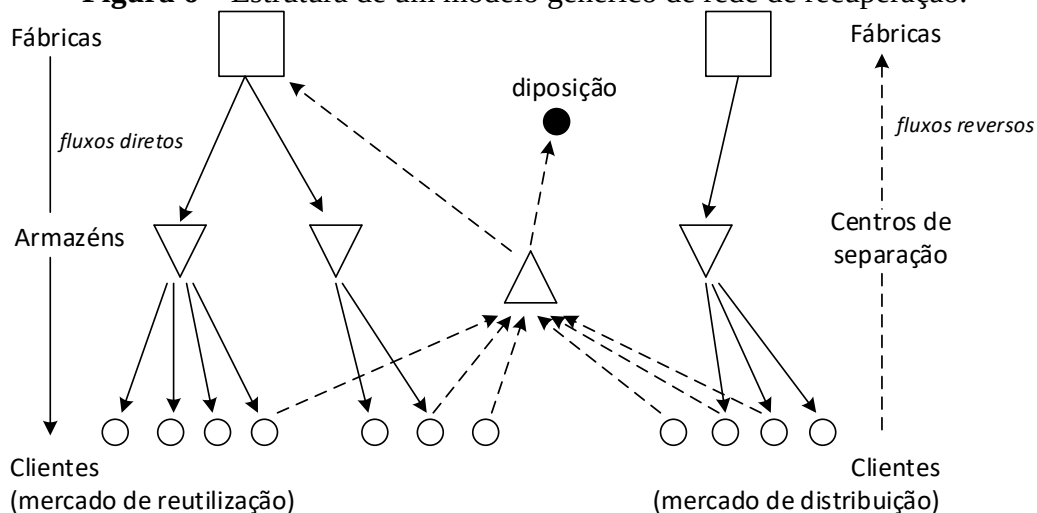
Para Fleischmann (2001), a principal característica das redes de recuperação é a incerteza. A questão era apenas se os modelos são flexíveis o bastante para incluir os aspectos de recuperação dos produtos. Por isso, ao analisar a literatura sobre o assunto, o autor (*op.cit.*) realizou uma análise quantitativa das redes de recuperação, e formulou um modelo genérico, de acordo com características e modelos encontrados na literatura. O autor ainda lembra que as redes de recuperação formam um elo entre dois mercados: um mercado onde o recuperador recolhe produtos utilizados e um mercado de reutilização onde se vendem produtos recuperados.

Na estrutura da rede desenvolvida foram considerados três níveis intermediários de instalações, a saber: centros de separação, local em que as atividades de separação e inspeção são executadas; fábricas para o reprocessamento de bens e armazéns de distribuição. No entanto, o autor distinguiu dois tipos de disposição final – recuperação e disposição – pois a recuperação pode não ser possível para todos os produtos coletados, o que é relevado durante a inspeção nos centros de triagem.

É importante deixar claro que, para Fleischmann (2001), a “recuperação” específica dessa atividade gera ganho, e a “recuperação de material” significa reciclagem e “recuperação de valor adicionado”, as quais são entendidas como reparo e remanufatura.

O modelo da estrutura da rede de recuperação é mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Estrutura de um modelo genérico de rede de recuperação.



Fonte: Adaptado de Fleischmann (2001, p. 64).

Na rede ilustrada na Figura 6, procura-se decidir o número de instalações, localizações e alocação para os correspondentes fluxos. No problema de otimização MILP são definidas potenciais localizações de instalações como variáveis binárias e os fluxos como variáveis de decisão contínua. Segundo Fleischmann (2001), o objetivo é minimizar o somatório dos investimentos e custos operacionais. Para isso, duas restrições devem ser levadas em consideração que são as condições lógicas de fluxos e instalações. Primeiro, qualquer solução deverá concordar com o mercado de disposição e de reuso; segundo, devem ser avaliadas as restrições econômicas e técnicas de disposição final.

Para Fleischmann et al. (1997):

As estruturas das redes de recuperação incluem a escolha de métodos de coleta, localização e capacidade de armazenamento, operações de recuperação e distribuição. Comparando estas tarefas com as redes convencionais de produção-distribuição, a maior diferença surge no fornecimento (FLEISCHMANN et al., 1997, p.69).

Em um sistema tradicional de produção-distribuição, o suprimento é uma variável controlada na qual o tempo, quantidade e qualidade da distribuição podem ser controlados de acordo com a necessidade do sistema. Em contraste com o sistema de recuperação, onde os suprimentos apresentam incertezas quanto à qualidade, quantidade e tempo de retorno do produto e por isso podem ser difíceis de controlar. Desse modo, os suprimentos aparecem como sendo a maior distinção entre a rede para recuperação de produtos e a tradicional.

Outro ponto importante é que fluxos reversos estão envoltos em um nível de incerteza considerável. Ao se definir um sistema de Logística Reversa, a incerteza sobre quantidade e qualidade se torna bastante relevante (THIERRY et al., 1995).

A diferença na distribuição entre a rede tradicional e a reversa é pequena. A incerteza na demanda para produtos recuperados produz essa situação. Possivelmente, quando o mercado para produtos recuperados se estabelecerem e a rede para recuperação de produtos se tornarem padrão na cadeia de suprimentos, esta diferença tenderá a desaparecer.

Todos estes fatores levam a concluir que um sistema de Logística Reversa, embora envolva os mesmos elementos básicos de um sistema logístico tradicional, deve ser planejado e executado em separado e como atividade independente.

Assim, Fleischmann (2001), adotou as seguintes notações:

- **Índices fixos:**

$I = \{1, \dots, N_p\}$, conjunto de locais com potencial para fábricas;

$I_0 = I \cup \{0\}$, sendo que 0 denota a opção de disposição;

$J = \{1, \dots, N_w\}$, conjunto de localizações com potencial para depósitos (armazéns);

$K = \{1, \dots, N_c\}$, conjunto de localizações de clientes em mercados de disposição e reuso;

$L = \{1, \dots, N_r\}$, conjunto de potenciais localizações para centro de separação;

- **Variáveis**

X_{ijk}^f : fluxo direto, fração da demanda do cliente k ser servido da fábrica i e armazém j ; $i \in I$,
 $j \in J$; $k \in K$;

X_{kli}^r : fluxo reverso; fração de retorno do cliente k ser retornado pelo centro de separação l
para a fábrica i ; $k \in K$, $l \in L$; $i \in I_0$;

U_k : fração insatisfeita da demanda do cliente k , $k \in K$;

W_k : fração não coletada de retorno do cliente k , $k \in K$;

Y_i^p : indicador de abertura de planta i , $i \in I$

Y_j^w : indicador de abertura de armazém j , $j \in J$

Y_l^r : indicador de abertura de centro de separação l , $l \in L$

- **Custos**

c_{ijk}^f : unidade de custo variável da demanda de serviço do cliente k desde a fábrica i e
armazém j , incluindo transporte, produção e custo de manutenção; $i \in I$, $j \in J$; $k \in K$;

c_{kli}^r : unidade de custo variável de retorno, desde o cliente k pelo centro de separação l para a
fábrica i , incluindo transporte e custo de manutenção menos custo de economia da
produção na planta i ; $i \in I$, $l \in L$; $k \in K$;

c_{klo}^r : unidade de custo variável de disposição de retornos desde o cliente k pelo centro de
separação l , incluindo coleta, transporte e custo de manutenção e disposição; $l \in L$; $k \in$
 K ;

c_k^u : custo da penalidade por não servir a demanda do cliente k ; $k \in K$;

c_k^w : custo da penalidade por não coletar o retorno do cliente k ; $k \in K$;

f_i^p : custo fixo da abertura da planta i ; $i \in I$;

f_j^w : custo fixo da abertura do armazém j ; $j \in J$;

f_l^r : custo fixo da abertura do centro de separação l ; $l \in L$.

- **Parâmetros**

d_k : demanda do cliente k no mercado de reuso; $k \in K$;

r_k : retorno do cliente k no mercado disposição; $k \in K$;

γ : fração mínima de disposição.

Desse modo, Fleicshmann, (2001) formulou o modelo genérico da rede de recuperação, a saber:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i \in I} f_i^p Y_i^p + \sum_{j \in J} f_j^w Y_j^w + \sum_{l \in L} f_l^r Y_l^r + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c_{ijk}^f d_k X_{ijk}^f + \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{i \in I_0} c_{kli}^r r_k X_{kli}^r \\ & + \sum_{k \in K} c_k^u d_k U_k + \sum_{k \in K} c_k^w r_k W_k \end{aligned}$$

Sujeito as seguintes restrições:

$$\begin{aligned} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} X_{ijk}^f &= 1 - U_k & \forall k \in K \\ \sum_{l \in L} \left(\sum_{i \in I} X_{kli}^r + X_{klo}^r \right) &= 1 - W_k & \forall k \in K \\ \gamma \sum_{i \in I_0} X_{kli}^r &\leq X_{klo}^r & \forall k \in K, l \in L \\ \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} r_k X_{kli}^r &\leq \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} d_k X_{ijk}^f & \forall i \in I \\ \sum_{j \in J} X_{ijk}^f &\leq Y_i^p & \forall i \in I; k \in K \\ \sum_{i \in I} X_{ijk}^f &\leq Y_j^w & \forall j \in J; k \in K \\ \sum_{i \in I_0} X_{kli}^r &\leq Y_l^r & \forall k \in K; l \in L \\ Y_i^p, Y_j^w, Y_l^r &\in \{0,1\} & \forall i \in I; j \in J, l \in L \\ 0 \leq X_{ijk}^f, X_{kli}^r, U_k, W_k &\leq 1 & \forall i \in I; j \in J, k \in K \end{aligned}$$

Percebe-se que este modelo é genérico, podendo servir para diversas situações da logística reversa.

3.7 MODELOS DE ANÁLISE OPERACIONAL OU TÁTICA COM A LOGÍSTICA REVERSA

Vários autores desenvolveram, nos últimos anos, modelos MILP aliado à técnica *fuzzy*, a um algoritmo, a um modelo de otimização robusta, para a solução de problemas como localização de instalações, rotas, estratégia de coleta, tomada de decisão em relação à alocação, investimento e aos custos operacionais, maximização do lucro e redução de custos.

Pati, Vrat e Kuma (2006), formularam um modelo de otimização linear para a indústria de papel com o objetivo de minimizar os custos de produção. Em 2008, formularam um modelo MILP para gerenciamento do sistema logístico de reciclagem de papel, buscando-se reduzir os custos reversos. Em 2010 utilizaram um modelo linear de programação/combinatória para uma cadeia de suprimento de papel com a finalidade de minimizar o custo de fabricação, com a mistura de matéria prima e papel pós-consumo.

Em 2008, Tuzkaya; Gülsün usaram a programação *fuzzy* para avaliar a localização de centros de retorno de produtos de uma rede reversa. Hanafi, Kara e Kaebernick (2008) utilizaram o método *fuzzy* combinada com o modelo de rede de coleta para produtos eletroeletrônicos em fim de vida, como coleta de celulares na Austrália. Já Min e Ko (2008) propuseram um modelo MILP integrado a um algoritmo genético com o objetivo de resolver um problema de localização e alocação de instalações de recuperação para fornecedores logísticos terceirizados.

Em 2010, Easwaran; Üster desenvolveram um modelo MILP para uma rede de ciclo fechado de multiprodutos com canais direto e reverso integrados, cujo objetivo era minimizar processos, transportes e custos fixos de localização.

Outro estudo desenvolvido, no ano de 2010, foi o de Qin e Ji, que usaram a lógica *fuzzy* para projetar uma rede de recuperação de produtos em uma cadeia reversa a fim de lidar com as incertezas da rede de recuperação.

3.8 REDE REVERSA PARA REEE

Por causa da redução dos ciclos de vida dos produtos eletrônicos e o consumo crescente, a recuperação do valor destes bens, após o uso, tornou-se uma necessidade. A preocupação com o meio ambiente e a busca por um desenvolvimento sustentável surgiu como um paradigma importante na concepção de todas as políticas sociais e econômicas, sejam públicas ou privadas. Logo a logística reversa se apresenta como uma estratégia para reduzir e reutilizar resíduos estando em consonância com os princípios de um desenvolvimento sustentável.

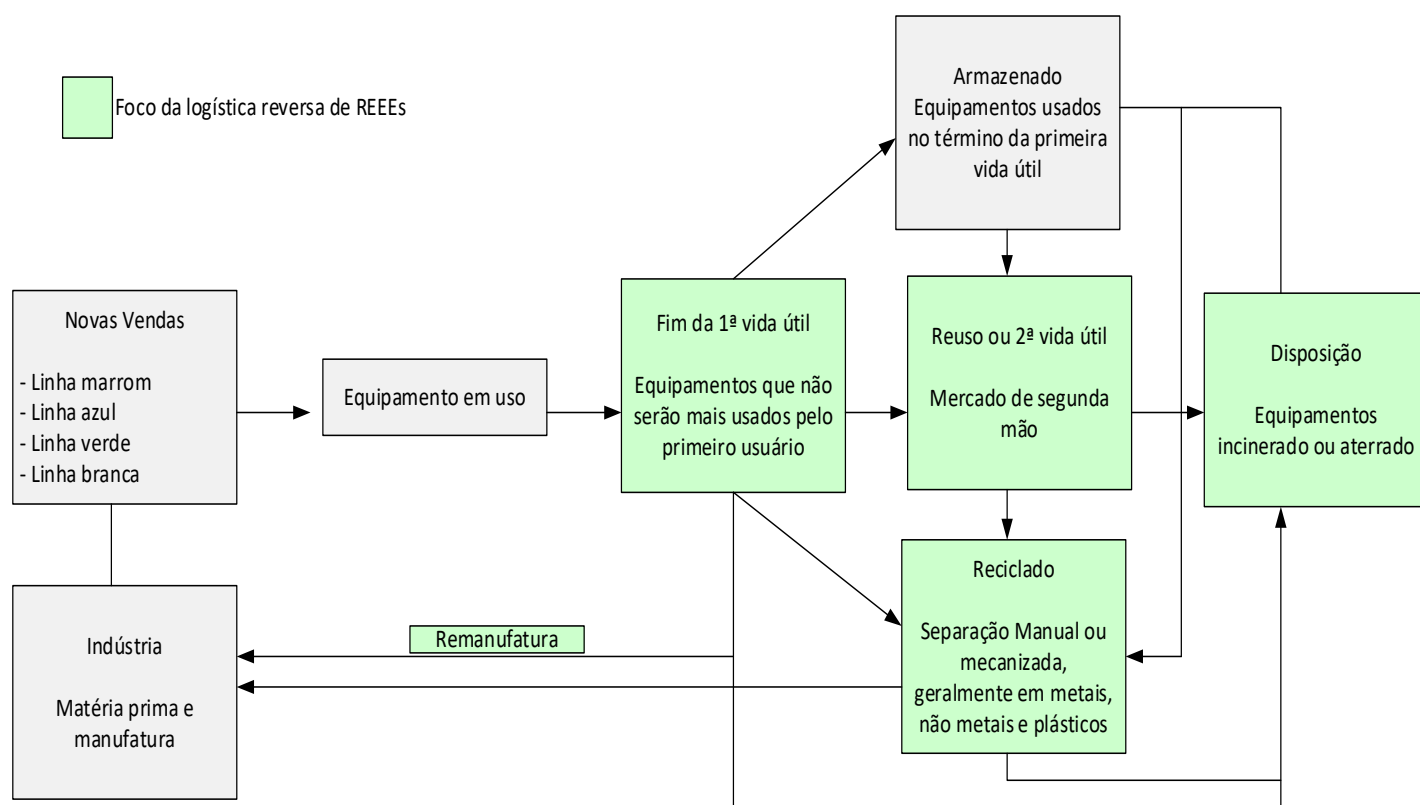
O projeto de uma rede de reversa de recuperação de produtos é um dos problemas mais importantes no campo da logística reversa. Muitos pesquisadores realizaram análises quantitativas de redes de recuperação de produtos e propuseram modelos matemáticos. No entanto, a maior parte dos estudos concentrou-se apenas no custo total ou no lucro, entre eles Jayaraman et al. (2003), Janse, Schuur e Brito (2005), Min et al. (2006), Lee e Li (2008), Alumur et al. (2012), Das e Chowdhury (2012), Lieckens e Vandaele (2011), Li et al. (2012).

Cada um propôs um modelo matemático e considerou o custo total ou o lucro para ser um único objetivo, e função em seus estudos. Outros autores conduziram pesquisa sobre modelos matemáticos de localização de aterros sanitários, entre eles o estudo desenvolvido por Hong et al. (2006), que exploraram o modelo MILP em relação à análise e à estrutura dos sistemas de produção reversa sobre REEE, como TVs e computadores. O modelo buscou maximizar o lucro. Aplicaram o modelo em um sistema de eletrônicos usados no Estado da Georgia, EUA.

É importante reconhecer que a logística reversa só começa quando um consumidor de fato descarta o seu equipamento eletroeletrônico, esteja esse em condições de uso ou não, tenha o equipamento passado pela fase de reuso ou não.

Na Figura 7 são apresentadas as atividades da Logística Reversa de REEE.

Figura 7 - Atividades da Logística Reversa de REEE



Fonte: Miguez (2010).

4 LÓGICA FUZZY

A Lógica *Fuzzy* ou lógica Nebulosa pode ser aplicada em diversas áreas, especialmente, nas áreas de controle e de tomada de decisão.

A teoria dos conjuntos *fuzzy* foi introduzida pela primeira vez por Zadeh, em 1965. Ele foi motivado observando que o raciocínio humano pode utilizar conceitos e conhecimentos que não têm limites bem definidos (PEDRYCZ, 1995). Em 1976, a *Blue Circle Cement* desenvolveu uma aplicação para controlar fornos de cimento (HOLMBLAD; OSTERGAARD, 1982). Mais e mais implementações *fuzzy* têm sido relatadas desde a década de 1980, e aplicadas em todos os aspectos na sociedade de hoje.

A lógica *fuzzy* é uma metodologia de resolução de problemas que fornece de uma maneira simples as conclusões definitivas a partir de informações vagas e imprecisas. A teoria dos conjuntos nebulosos é útil para examinar muitos problemas do mundo real. Esta técnica baseia-se na teoria dos conjuntos nebulosos (ZADEH, 1965), que permite gerar respostas baseadas em informações vagas, ambíguas e qualitativamente incompletas e imprecisas. Neste aspecto, os sistemas de base *Fuzzy* têm habilidade de raciocinar de forma semelhante ao raciocínio dos humanos. (WEBER; KLEIN, 2003³ apud ZIS, 2012). *Fuzzy* é um método de modelagem adequado para lidar com medidas intangíveis e qualitativas que utiliza teoria de conjuntos *fuzzy* e valores linguísticos e é representado de maneira muito simples e natural, levando à construção de sistemas compreensíveis e de fácil manutenção (LIN; HSU; SHEEN, 2007).

Segundo Gomide e Gudwin (1994), a teoria de modelagem e controle *fuzzy* trata do relacionamento entre entradas e saídas, agregando vários parâmetros de processo e de controle. Isso permite a consideração de processos complexos, de modo que os sistemas de controle resultantes proporcionam um resultado mais preciso.

Para Câmara et al.⁴ (1996, apud CARVALHO, 2010), a lógica *fuzzy* consiste em: “uma metodologia de caracterização de classes que não define limites rígidos (bordas). Permite capturar informações de diversas naturezas e convertê-las para um formato numérico, sendo útil na modelagem de sistemas complexos”.

Na maioria das aplicações, a lógica *Fuzzy* pode modelar funções não lineares de complexidade arbitrária para um grau de precisão desejado.

³ WEBER, Leo; Klein, Pedro Antonio Trierweiler. Aplicação da Lógica Fuzzy em Software e Hardware. 1. ed. Canoas: Ulbra, 2003

⁴ CÂMARA, G.; CASANOVA, M. A.; HEMERLY, A. S.; MAGALHÃES, G. C.; MEDEIROS, C. M. B. Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica. São José dos Campos: INPE. Campinas: IBM Brasil/CPqDTELEBRÁS/UNICAMP, 1996. 193p.

A lógica nebulosa trata de raciocínio que é aproximado ao invés de fixo e exato. Comparado aos conjuntos binários tradicionais (onde as variáveis podem assumir valores verdadeiros ou falsos), as variáveis de lógica *fuzzy* podem ter um valor de verdade que varia em grau entre 0 e 1. A lógica *fuzzy* foi estendida para lidar com o conceito de verdade parcial, onde a verdade pode variar entre completamente verdadeiro e completamente falso (SHRUTI e MUDHOLKAR, 2013⁵ apud OMAR; WAWERU; RIMIRU, 2015).

A lógica nebulosa baseia-se na teoria dos conjuntos *fuzzy*, que é uma generalização da teoria dos conjuntos clássico, ou seja, é um caso especial da teoria dos conjuntos *fuzzy*. Por fim, pode-se fazer uma metáfora, a teoria do conjunto clássico é um subconjunto da teoria dos conjuntos *fuzzy* (OMAR; WAWERU; RIMIRU, 2015).

Segundo Rongjun e Stanly (1993), a pesquisa sobre a teoria dos conjuntos *fuzzy* vem crescendo constantemente desde meados da década de 1960. Pesquisas sobre uma ampla variedade de aplicações também têm sido muito ativas e tem produzido resultados impressionantes.

4.1 CONJUNTOS NEBULOSOS

Segundo Omar, Waweru e Rimiru (2015):

um conjunto nebuloso é um conjunto não claramente definido. Ele pode conter elementos com um grau parcial de associação com lógica multivalorada. A fuzzificação compreende o processo de transformar valores discretos em graus de adesão para termos linguísticos de conjuntos *fuzzy*. Um membro da função é usado para associar uma nota (ou valor) a cada termo linguístico. Defuzzificar significa avaliar vários conjuntos de membros estabelecidos pelo sistema para o controle baseado em lógica *fuzzy*, como "velocidade muito rápida", "velocidade muito lenta" em um valor de saída específico. Um sistema de lógica nebulosa consiste em quatro partes principais: fuzzificar, regras, inferência e defuzzificar (OMAR; WAWERU; RIMIRU, p. 24, 2015).

O processo da lógica *fuzzy* envolve a obtenção de um conjunto *crisp* de dados de entrada que são reunidos e convertidos para um conjunto *fuzzy* usando variáveis linguísticas, e funções de pertinência (PEDRYCZ, 2005). Esta etapa é conhecida como “fuzzificação”. Em seguida, uma inferência é feita com base em um conjunto de regras e, por fim, a saída resultante nebulosa é mapeada para uma saída *crisp* usando as funções de pertinência, na defuzzificação (OMAR; WAWERU; RIMIRU, 2015).

A diferença entre os conjuntos clássicos (*crisp*) e nebulosos é dada pela introdução de uma função de pertinência. Um conjunto *fuzzy* é uma extensão de um conjunto *crisp*. Conjuntos *Crisp* permitem apenas que elementos de um subconjunto *A* sejam pertinentes ou

⁵ SHRUTI, S. J., e MUDHOLKAR, R. R. International Journal of Soft Computing and Engineering, 3(2), 306-320. 2013.

não ao conjunto U . Os valores que definem esta pertinência são 0 para “não pertinência” e 1 para a “pertinência total” de um elemento A em U . Tradicionalmente, uma proposição lógica tem dois extremos: ou “completamente verdadeiro” ou “completamente falso”. Entretanto, na Lógica *Fuzzy*, uma premissa varia em grau de verdade de 0 a 1, o que leva a ser parcialmente verdadeira e parcialmente falsa.

Com a incorporação do conceito de “grau de verdade”, a teoria dos Conjuntos *Fuzzy* estende a teoria dos Conjuntos Tradicionais. Os grupos são rotulados qualitativamente (usando termos linguístico, tais como: *alto*, *morno*, *ativo*, *pequeno*, *perto* entre outros) e os elementos destes conjuntos são caracterizados variando o grau de pertinência (valor que indica o grau em que um elemento pertence a um conjunto).

Em um conjunto *crisp*, a pertinência ou não do elemento x ao conjunto A é descrita pela função característica: $\mu_A(x)$, quando $\mu_A(x) = 1$, $x \in A$ e quando $\mu_A(x) = 0$, $x \notin A$. O conjunto de teoria *fuzzy* estende esse conceito. Um subconjunto A em um universo U é caracterizado pela função $\mu_A(x)$, que pode receber valores no intervalo $[0,1]$, para representar o grau de pertinência de um determinado elemento dentro de um conjunto. Ao definir um grau de pertinência de um determinado conjunto U diz-se que os elementos se constituem de pares ordenados de um conjunto nebuloso F , onde o primeiro elemento pertence ao conjunto U e o segundo ao intervalo $[0,1]$ (AGUIAR et al.⁶, 2007 apud ZIS, 2012).

Um exemplo dado por Barros e Bassanezi⁷, (2006, apud Zis, 2012), os quais consideram um subconjunto de números reais próximos a 2. Dados os elementos 2,001 e 7, pode-se afirmar, com base na teoria clássica dos conjuntos, que o número mais próximo de 2 seria o número 2,001, portanto pertenceria ao conjunto, porém não se pode afirmar o quanto este número pertence ao conjunto.

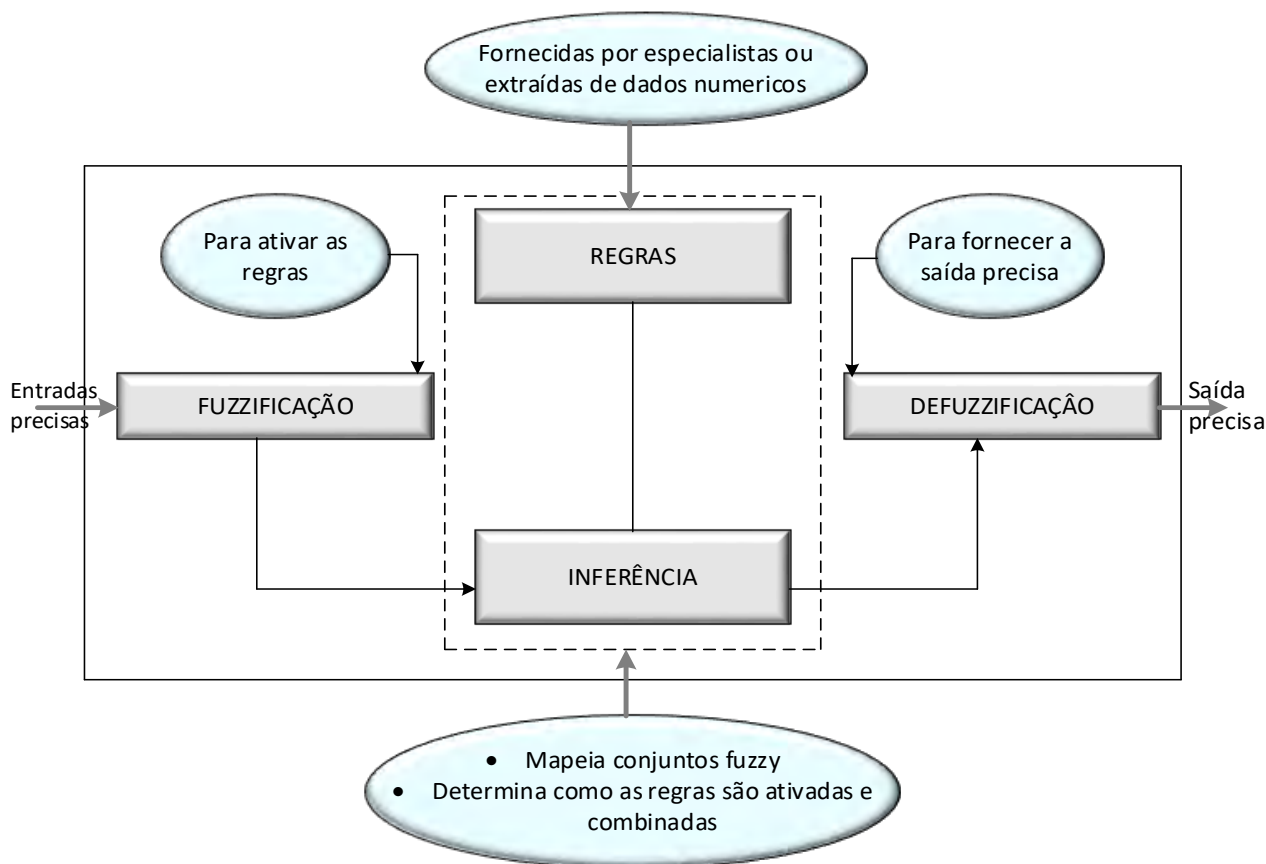
4.2 SISTEMA FUZZY

Um sistema de inferência *fuzzy* define essencialmente um mapeamento não linear de dados vetoriais de entrada em uma saída escalar, utilizando regras *fuzzy*. O processo de mapeamento envolve a adesão de funções de entrada ou saída os operadores *fuzzy*, as regras *fuzzy se - então*, a agregação de conjuntos de saída, e *defuzzificação*.

A Figura 8 mostra um modelo geral de sistema de inferência nebulosa.

⁶ AGUIAR, H. (coord.) et al. Inteligência Computacional Aplicada à Administração, Economia e Engenharia em matlab. São Paulo: Thomson Learning, 2007

⁷ BARROS, L. C. de; BASSANEZI, R. C. Tópicos de Lógica Fuzzy e Biomatemática. Campinas: UNICAMP/IMECC, 2006. V.5.

Figura 8 - Componentes do Sistema *Fuzzy*

Fonte: Aguiar et al. (2007 apud ZIS, 2012).

Pode ser visto, a partir da Figura 8, que um sistema de inferência *fuzzy* contém quatro componentes: a fuzzificação, inferência, base de regras, e defuzzificação. A regra base contém regras linguísticas que são fornecidos por especialistas. Também é possível extrair a partir de dados numéricos. Uma vez que as regras foram estabelecidas, o sistema pode ser visto como um sistema que mapeia um vetor de entrada para um vetor de saída.

Na etapa de fuzzificação são mapeados os números de entrada em correspondentes associações nebulosas. Isto é necessário de modo a ativar as regras que estão em variáveis linguísticas (KLIR; YUAN, 1995).

Nessa fase, o usuário ou especialista, ao usar um sistema de inferência nebuloso, escolhe os conjuntos que serão utilizados tomando como base o contexto de estudo. Aos conjuntos serão definidas as funções de pertinência de cada conjunto e a variável linguística de cada conjunto (ZIS, 2012).

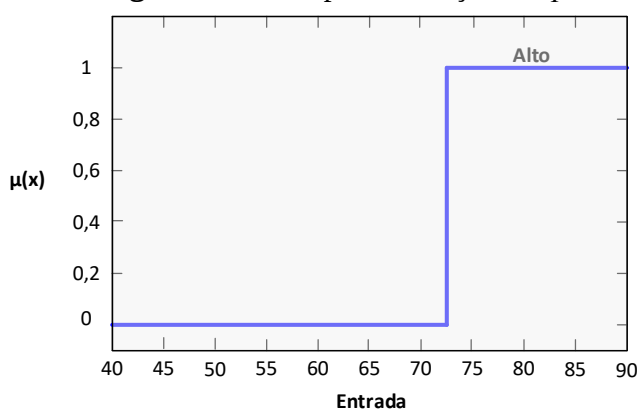
4.2.1 Fuzzificação

O primeiro passo dentro do sistema *fuzzy* é a fuzzificação. A fuzzificação é usada para transformar os valores *crisp* obtidos a partir do sinal de entrada em graus de adesão para termos linguísticos de conjuntos *fuzzy* (ZADEH, 1975).

No exemplo dado por *Fuzzy Logic Fundamentals* (2001) x indica altura, então $F(x)$ pode se referir a um conjunto como sendo pequeno, médio ou alto. Considerando um conjunto *fuzzy* de altura, o universo “alto” pode ser considerado entre 40 polegadas e 90 polegadas. Em um conjunto *crisp*, todas as pessoas com altura 72 ou mais polegadas são considerados altas, porém, sabe-se que o grau de incerteza em relação a quanto o número pertence ao conjunto é indefinido. Assim, é preciso determinar o grau em que eles pertencem ao conjunto nebuloso por meio das funções de associação.

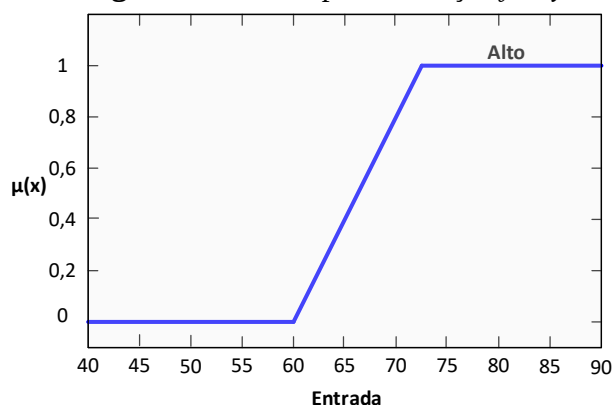
A função altura no conjunto *crisp* é mostrada na Figura 9. O conjunto *fuzzy* correspondente mostra uma função de pertinência, como é mostrada na Figura 10. A curva define a passagem de “não alto” e apresenta o grau de pertinência para uma dada altura.

Figura 9 – Exemplo da função *crisp*



Fonte: Adaptado *Fuzzy Logic Fundamentals* (2001).

Figura 10 – Exemplo de função *fuzzy*

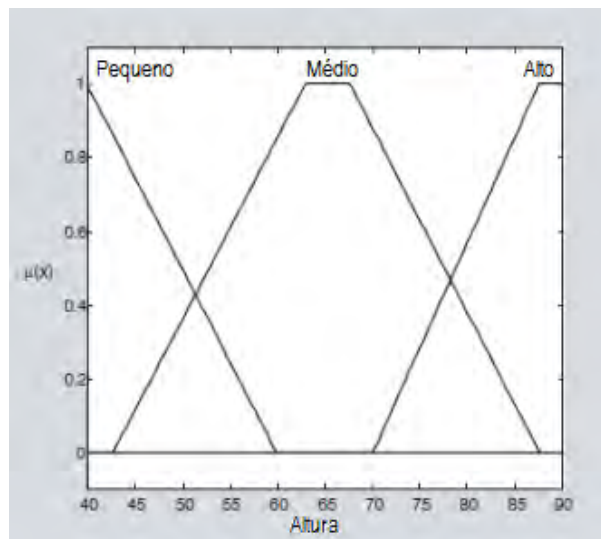


Fonte: Adaptado de *Fuzzy Logic Fundamentals*

Este conceito pode ser estendido a vários conjuntos. Se for considerado um universo entre 40 polegadas e 90 polegadas, então, para descrever a altura, pode-se usar três valores como curto, médio e alto. Na teoria clássica de conjuntos curto, médio e alto não são usados. Já as funções de pertinência *fuzzy* representam uma transição suave. Por exemplo, uma pessoa com altura de 65 polegadas pode ter grau de pertinência 1 para conjunto de altura média, enquanto uma pessoa com altura de 60 polegadas pode ser um elemento do conjunto pequeno

e também do conjunto altura média, só o grau pertinência varia de acordo com esses conjuntos, como mostra a Figura 11.

Figura 11 – Função Trapezoidal



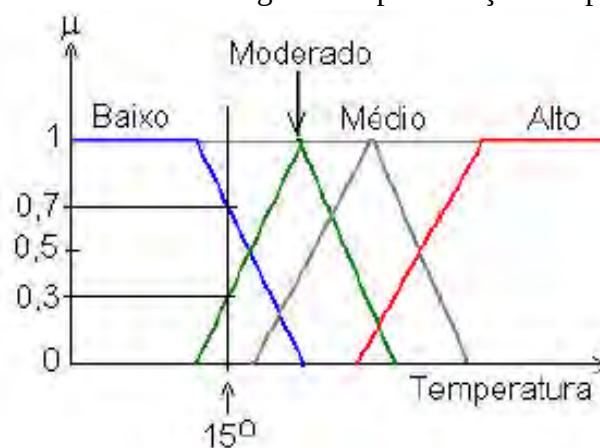
Fonte: *Fuzzy Logic Fundamentals* (2001).

4.2.2 Variáveis linguísticas

As variáveis linguísticas de um conjunto *fuzzy* são definidas a partir do conteúdo que se deseja representar. Estão ligadas ao grau de pertinência que será utilizado para representar a pertinência ou não de um atributo no conjunto (SHAW; SIMÕES, 1999⁸ apud ZIS, 2012).

Como exemplo, pode-se citar a temperatura que pode ter vários estados: fria, morna, quente. A mudança de um estado para o outro não precisa ser rigorosamente definida. Estas variáveis linguísticas fornecem a abstração do modelo matemático de cada conjunto, pois o estado em que a temperatura se encontra está sujeita a diferentes interpretações. Este modelo matemático é definido por uma função de pertinência que define um conjunto nebuloso. A Figura 12 representa a utilização de variáveis linguísticas.

Figura 12 – Variáveis linguísticas para funções de pertinência



⁸ SHAW, I. S; SIMÕES, M. G. Controle e Modelagem Fuzzy. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

Exemplo:

$$\mu(15^\circ)_{\text{baixo}} = 0,7$$

$$\mu(15^\circ)_{\text{moderado}} = 0,3$$

$$\mu(15^\circ)_{\text{médio}} = 0$$

$$\mu(15^\circ)_{\text{alto}} = 0$$

Fonte: Minussi (2009).

4.3 BASE DE REGRAS

A base de regras pode ser considerada como parte do núcleo de inferência dos conjuntos *fuzzy*. Nesta fase, são aplicadas as proposições (descritas de forma linguísticas) que foram definidas pelo usuário na fase de *fuzzificação* a fim de modelar os conjuntos *fuzzy* (WEBWER, KLEIN⁹, 2003, apud ZIS, 2012).

Para exemplificar o uso das proposições (*e*, *ou*, *não* e operadores de implicação *se - então*) na base de regras, será apresentado o exemplo dado por ZIS, (2012). Supondo que na classe de animais há aquáticos, terrestres e aves. Estas variáveis linguísticas representarão o conjunto nebuloso de saída. Para o conjunto de entrada serão usadas as variáveis linguísticas: penas, nadadeiras, voa, mergulha, anda. Veja:

se animal tem penas e voa, então é ave;

se animal tem nadadeira e mergulha, então é aquático;

se animal anda então é ave ou terrestre ou aquático.

Isto posto, pode-se afirmar que o uso de variáveis linguísticas de um conjunto nebuloso em uma proposição é formado de *antecedentes* e *consequentes*, sendo que no primeiro exemplo, o conjunto nebuloso composto por penas e voa representam os *antecedentes* e o conjunto nebuloso composto por (ave) representa o *consequente* da proposição (WEBER; KLEIN, 2003 apud ZIS, 2012).

As saídas para todas as regras são então agregadas (FUZZY LOGIC FUNDAMENTALS, 2001). No exemplo dado anteriormente, percebe-se que é possível verificar o animal que anda pertence aos três conjuntos de saída. Porém, não é possível definir exatamente a qual conjunto pertence o animal. Nesse caso entra a etapa de inferência nebulosa.

Em sistema de inferência nebuloso, a ordem em que as regras são disparadas não afeta a saída.

⁹ WEBER, L; KLEIN; P. A. T. **Aplicação da Lógica Fuzzy em Software e Hardware**. Canoas: Ulbra, 2003.

4.3.1 Conetivos da lógica Nebulosa

A etapa de inferência dos conjuntos *fuzzy* define o mapeamento de entrada *fuzzy* em saída de conjuntos *fuzzy*. Ela determina o grau em que o antecedente é satisfeito para cada regra. Esta etapa relaciona as variáveis por meio das regras estabelecidas na base de regras *fuzzy* (KLIR; YUAN, 1995).

Na lógica *fuzzy*, as sentenças não são absolutamente verdadeiras ou falsas. Ela pode ser apenas 5% verdadeira (tecnicamente, o seu "grau de verdade" é 0,05) e as variáveis não são mais números, mas sim nomes ou fronteiras como alta ou baixa, rico ou pobre, quente ou frio. Os operadores que os modificam são por exemplo: bastante, pouco, médio, bonita, quase, baixo, alto, demais e outros. É nesta fase que se utilizam os operadores *t* norma e *t*-conorma em conjunto com as regras de inferência.

Os conetivos lógicos usam das proposições lógicas para definir a pertinência do elemento ao seu conjunto, estes são chamados de modificadores nebulosos (BAI; WANG, 2005). E podem ser:

- Operadores lógicos: *e*, *ou* e *não*; e
- Implicações: *se* e *então*.

Os operadores *E* (*AND*) e *OU* (*OR*) assumem o conceito matemático *min* e *max*, ou seja, para o operador *e* adota-se o valor mínimo resultante da inferência nebulosa e para o operador *ou*, o valor máximo (BAI; WANG, 2005). Zadeh (1965) define a união *fuzzy* e a intersecção *fuzzy* como:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x)\mu_B(x) \quad (1)$$

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x)\mu_B(x) \quad (2)$$

Para realizar a avaliação lógica dos elementos nebulosos em seu conjunto é necessário entender as extensões obtidas por meio das normas e conormas triangulares que são extensões dos conetivos nebulosos (BARROS; BASSANEZI, 2006).

4.3.2 Operadores T-norma e T-conorma

Segundo SPERB, (2002 apud ZIS, 2012, p. 26) [...], os operadores *t* norma e *t*-conorma possuem forte influência no resultado final do processo, pois se aplica a operação conforme os operadores selecionados na criação da proposição.

Os operadores de intersecção nebulosos, *e*, são referidos como operadores T-norma e tem como operador o símbolo $\wedge$, já os operadores de união nebulosos, *ou*, são conhecidos

como operadores *T*-conorm ou *S*-norma e tem como operador o símbolo $\vee$. Esses operadores são conhecidos como operações *max-min* (BAI; WANG, 2006).

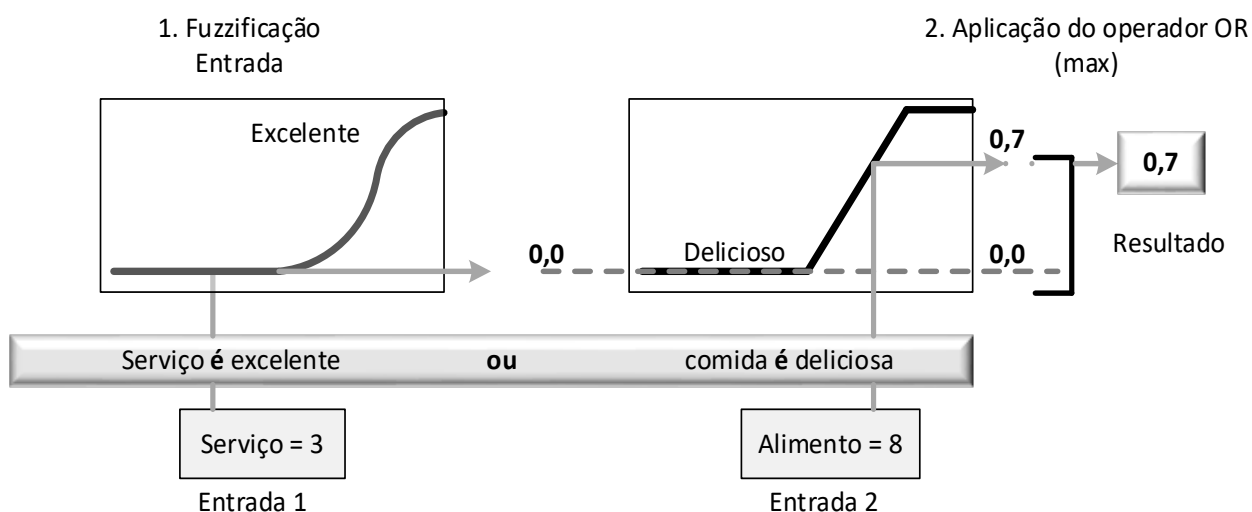
A proposição *não* implica em definir a negação resultante da aplicação de um conetivo lógico alterando o estado do resultado. É representado pelo símbolo η , por exemplo para $\eta(0) = 1$ e $\eta(1) = 0$ (ZIS, 2012).

Sistemas de inferência *fuzzy* consistem em regras *se - então* que especificam a relação entre o entrada e saída de conjuntos *fuzzy*. As relações *fuzzy* apresentam um grau de presença ou ausência de associação ou interação entre os elementos de dois ou mais conjuntos, como mostrado no exemplo anterior: *se <proposição nebulosa> então <proposição nebulosa>*.

Na Figura 13 mostra-se o operador *OR* na regra, avaliando o antecedente para o cálculo da gorjeta. Este exemplo é construído com três regras, e cada uma das regras depende da resolução das entradas em uma série de diferentes conjuntos linguísticos nebulosos: o serviço é ruim, o serviço é bom, a comida é ruim, a comida é deliciosa, e assim por diante. Antes que as regras possam ser avaliadas, as entradas devem ser fuzzificadas de acordo com cada um desses conjuntos linguísticos. Depois que as entradas são fuzzificadas. Conhecido o grau em que cada parte do antecedente é satisfeita, para cada regra, aplica-se o operador *fuzzy OR*.

As duas partes do antecedente (o serviço é excelente e a comida é deliciosa) produz os valores de associação *fuzzy* 0,0 e 0,7, respectivamente. O operador *fuzzy OR* simplesmente seleciona o máximo dos dois valores, como mostra a Figura 13.

Figura 13 – Aplicação do Operador *fuzzy OR*

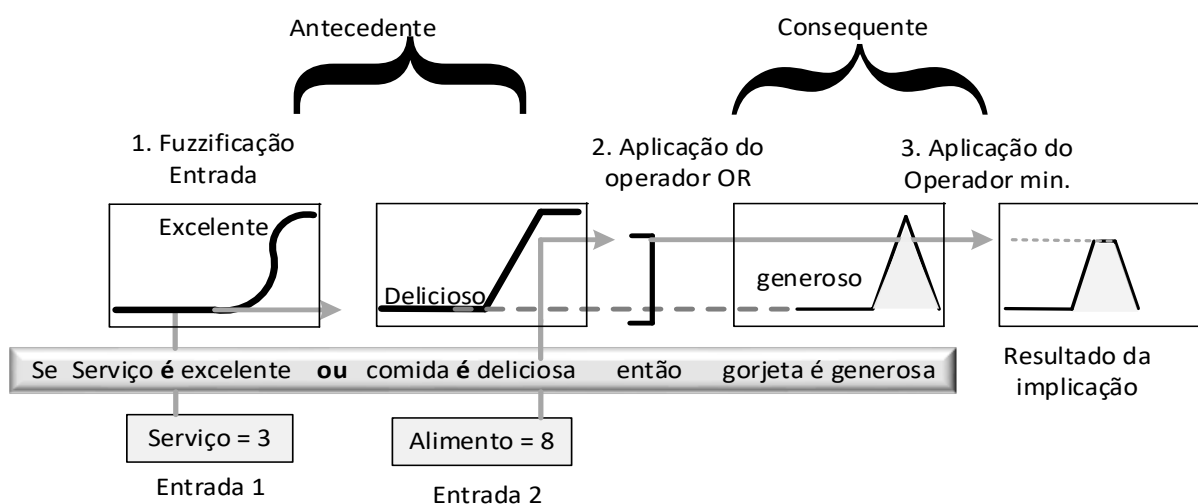


4.4 FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA

As funções de pertinência são usadas para fuzzificação e defuzzificação de um Sistema de Lógica *Fuzzy*, para mapear os valores de entrada não-*fuzzy* para termos linguísticos e vice-versa (METCALFE, 2005). Uma função de pertinência é usada para quantificar um termo linguístico (KLIR; YUAN, 1995).

Antes de aplicar o método de inferência, deve-se determinar o peso de cada regra, que deverá estar entre 0 e 1. Um *consequente* é um conjunto *fuzzy* representado por uma função de associação, que pesa adequadamente as características linguísticas que lhe são atribuídas. A entrada para o processo de inferência é um único número dado pelo antecedente, e a saída é um conjunto *fuzzy*. A inferência é implementada para cada regra. Na Figura 14 é apresentada a aplicação do método de inferência.

Figura 14 – Exemplo de aplicação do método de inferência



Fonte: Adaptado de Mathworks: apply implication method [200-].
(<https://www.mathworks.com/help/fuzzy/fuzzy-inference-process.html#FP347>).

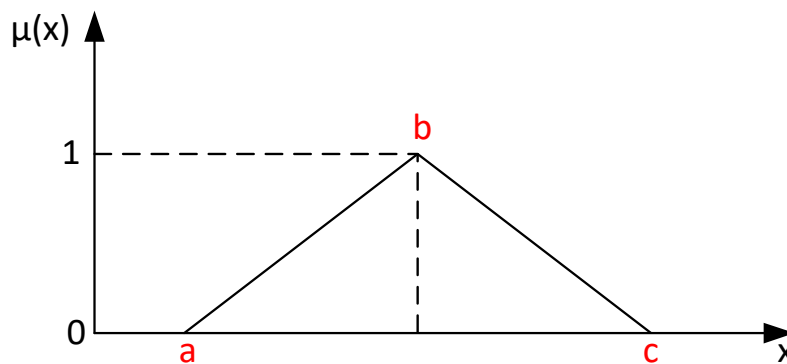
4.4.1 Tipos de funções de pertinência

As funções de pertinência de conjuntos nebulosos podem assumir vários formatos. As funções padrões utilizadas são: triangular, trapezoidal e senoidal. Funções de pertinência podem ter uma variedade de formas diferentes para descrever a mesma função; sendo as mais simples aquelas que são formadas usando linhas retas (FUZZY LOGIC FUNDAMENTALS, 2011, p. 64-65). A seguir são apresentados os modelos matemáticos, para a função triangular, trapezoidal e senoidal.

4.4.1.1 Função triangular

Uma das funções elementares mais básicas é a triangular. Na Figura 15, ilustra-se a função triangular, onde a , b e c representam as coordenadas x dos três vértices de $\mu_A(x)$ no conjunto *fuzzy* A . A coordenada a é definida como o limite inferior no conjunto A cujo grau de pertinência é *zero*. A coordenada c é definida como o limite superior cujo grau de associação é também *zero*. Finalmente, a coordenada b é o terceiro ápice do triângulo cujo grau de pertinência é *um* (porque as avaliações linguísticas meramente se aproximam do julgamento subjetivo da avaliação) (KLIR e YUAN,1995). As funções triangulares podem ser consideradas adequadas para captar a imprecisão dessas avaliações linguísticas (KLIR e YUAN,1995).

Figura 15 - Função Triangular



Fonte: Omar, Waweru e Rimiru (2015, p.36).

A equação 3 representa a fórmula matemática usada para calcular o grau de pertinência de qualquer elemento x , na função *fuzzy*:

$$f(x; a; b; c) = \begin{cases} 0, & x < a \\ (x - a)/(b - a) & a \leq x < b \\ (c - x)/(c - b), & b \leq x \leq c \\ 0; & c < x \\ \text{Restrição:} & a < b < c \end{cases} \quad (3)$$

4.4.1.2 Função trapezoidal

A função trapezoidal é especificada por 4 parâmetros $\{a, b, c, d\}$, como mostra a equação 4.

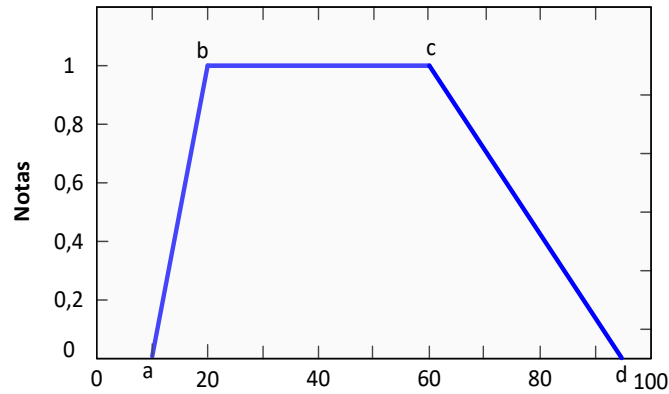
Por causa de suas fórmulas matemáticas simples e a eficiência computacional, tanto as funções triangulares quanto as trapezoidais têm sido amplamente utilizadas. (KLIR; YUAN, 2005, p. 39).

Função Trapezoidal:

$$f(x; a; b; c, d) = \begin{cases} 0, & x < a \\ (x - a)/(b - a) & a \leq x < b \\ 1; & b \leq x < c \\ (d - x)/(d - c), & c \leq x < d \\ 0; & d \leq x \end{cases} \quad (4)$$

Restrição: $a < b \leq c < d$

Os parâmetros $\{a, b, c, d\}$ (com $a < b \leq c < d$) determinam as coordenadas x dos quatro cantos da função trapezoidal. Na Figura 16, mostra-se uma função trapezoidal definida por $(x; 10, 20, 60, 95)$. Observe que uma função trapezoidal com parâmetro $\{a, b, c, d\}$ se reduz a uma função de pertinência triangular quando b é igual a c (BAI; WANG, 2006).

Figura 16 - Função Trapezoidal

Fonte: Adaptado de Omar, Waweru e Rimiru (2015, p. 36).

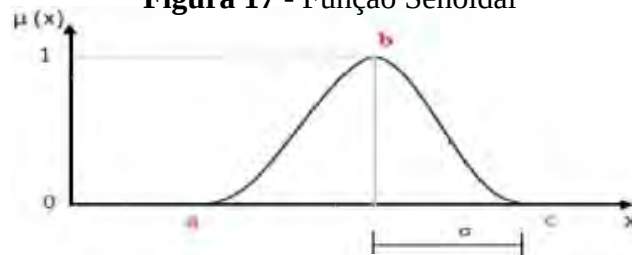
4.4.1.3 Função senoidal

A Função Senoidal é representada de acordo com a equação 5:

Função Senoidal:

$$\mu(x) = \left[(x - b/\sigma)^2 \right] \quad (5)$$

Quando x é a variável de entrada, b é o centro da função e σ é a constante que representa a largura da função de pertinência. As funções *fuzzy* senoidais são bastante comuns no que diz respeito aos sistemas de lógica *fuzzy* (OMAR; WAWERU; RIMIRU, 2015). A Figura 17 ilustra uma função Gaussiana típica.

Figura 17 - Função Senoidal

Fonte: Omar, Waweru e Rimiru (2015, p. 36).

Segundo Zis (2012, p. 23) “ao se escolher a função que representa um conjunto atribui-se o modelo matemático a ser aplicado, e o valor resultante é a definição do grau de pertinência, formando assim os pares ordenados de um conjunto nebuloso”.

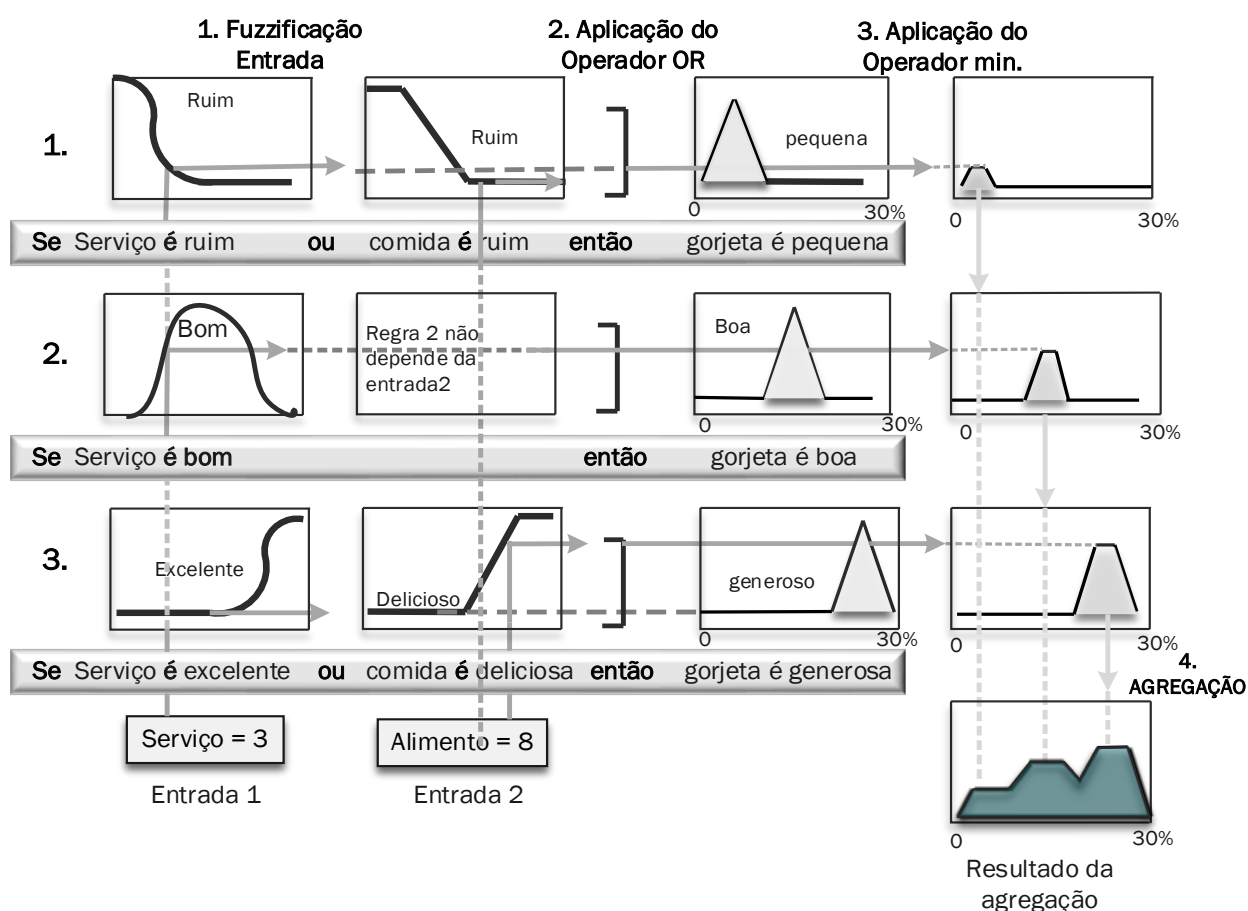
4.5 AGREGAÇÃO

Durante a agregação, conjuntos *fuzzy*, que representam a saída de cada regra, são combinados em um único conjunto *fuzzy* (FUZZY LOGIC FUNDAMENTALS, 2001).

Essencialmente, a agregação é o processo pelo qual os conjuntos difusos que representam a saída de cada regra são combinados em um único conjunto *fuzzy* que é usado como entrada para o processo de defuzzificação. Agregação ocorre apenas uma vez para cada variável de saída (BAIN; WANG, 2006).

A saída do processo de agregação é um único conjunto *fuzzy* que representa a variável de saída. Uma vez que o método agregação é comutativa, a ordem em que as regras são executadas não é importante. A Figura 18 reflete a agregação referente ao exemplo das Figuras 16 e 17.

Figura 18 – Agregação

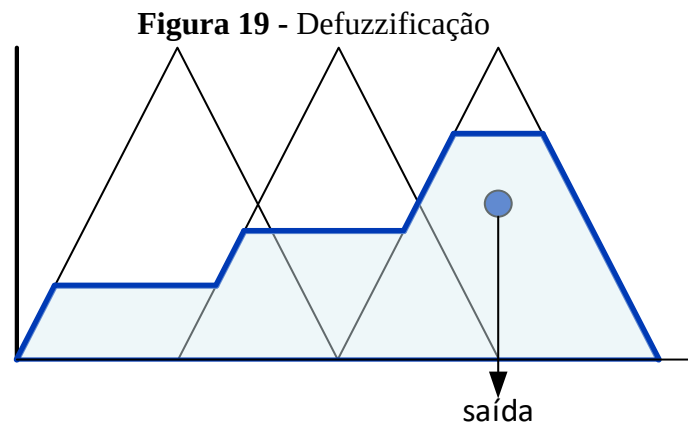


Fonte: Adaptado de Mathworks: aggregate all outputs [200-]. (<https://www.mathworks.com/help/fuzzy/fuzzy-inference-process.html#FP347>).

4.6 DEFUZZIFICAÇÃO

A entrada para o processo de defuzzificação é um conjunto *fuzzy*, e a saída do processo de defuzzificação é um conjunto *crisp*.

Após o passo de inferência, o resultado global é um valor difuso. Este resultado deve ser defuzzificado para obter saída crisp (BAI; WANG, 2006). Esta é a finalidade de um sistema de lógica difusa. Defuzzificação é realizada de acordo com a função de pertinência da variável de saída (FUZZY LOGIC FUNDAMENTALS, 2001). Por exemplo, suponha que temos o resultado em 40 na Figura 19 no final da inferência. Nesta figura, todas as áreas sombreadas pertencem ao resultado *fuzzy*. O objetivo é obter um valor nítido, representado com um ponto na figura, a partir desse resultado *fuzzy* (KLIR; YUAN, 1995).



Fonte: Omar, Waweru e Rimiru (2015, p. 37).

Existem vários métodos usados na defuzzificação como: máximo, média dos máximos, centroide, altura, entre outros. O mais usado método de defuzzificação utilizado é o cálculo centroide. Este método consiste em determinar o centro de massa do conjunto nebuloso que será a saída da defuzzificação (FUZZY LOGIC FUNDAMENTALS, 2001; TIZ, 2012).

4.6.1 Método do Centro de Gravidade (CoG)

O método Centro de gravidade é uma técnica para encontrar um valor crisp (u) a partir do ponto médio do conjunto *fuzzy* de saída usando uma média ponderada das notas de membros (BAI; WANG, 2006). Suponha que existe um conjunto difuso dentro de um universo discreto, e $\mu_{(xi)}$ é seu valor de associação na função de associação (KLIR; YUAN, 1995). A equação (6) pode ser usada para representar a média ponderada dos elementos no conjunto de suporte: (PEDRYCZ, 1995).

$$Z^* = \frac{\sum \mu_c(\bar{Z}) \cdot \bar{Z}}{\sum \mu_c(\bar{Z})} \quad (6)$$

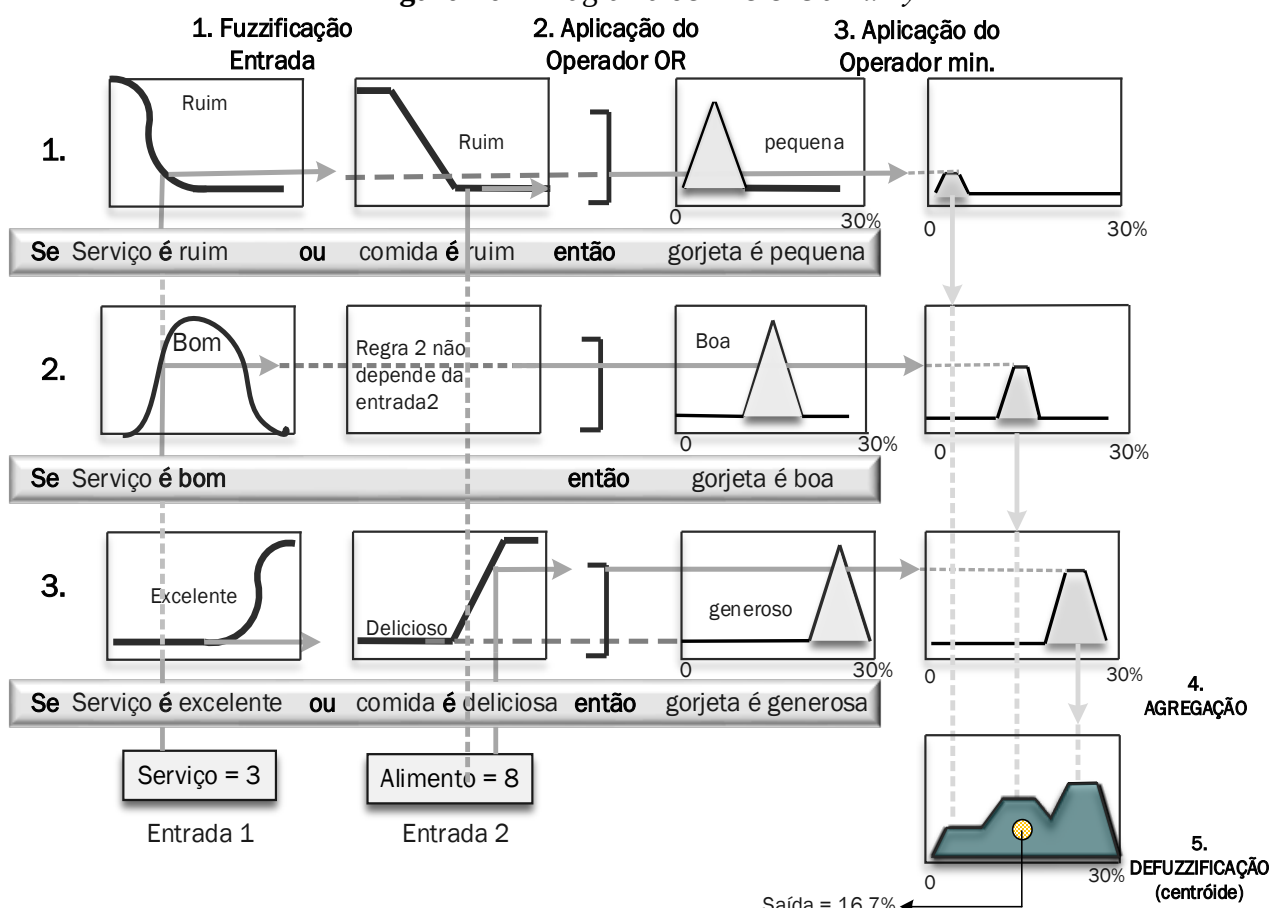
4.6.2. Método da média máxima

O método da média Máxima é uma abordagem usada para encontrar a média z em que a associação do conjunto *fuzzy* está no máximo (BAI; WANG, 2006). Pode existir vários pontos máximos e assim, uma prática comum é adotar a média de todos os valores máximos. Este método ignora completamente a forma do conjunto *fuzzy*, mas a complexidade computacional é mais simples do que outros métodos e produz resultados relativamente bons (FUZZY LOGIC FUNDAMENTALS, 2001). Conforme mencionado anteriormente, sistemas difusos usam regras difusas e raciocínio *fuzzy* para se basear em uma conclusão para um determinado cenário. O raciocínio *fuzzy* é baseado em um princípio que permite mapear uma função entre dois conjuntos *fuzzy* (OMAR; WAWERU; RIMIRU, 2015). Para um dado cenário, existe um conjunto difuso A num universo Z . O princípio de extensão afirma que se existe uma função f , então o conjunto *fuzzy* B é dado pela equação (7) (OMAR; WAWERU; RIMIRU, 2015).

$$B = f(A) = \sum \mu_A(x_i)/f(x_i) \quad (7)$$

Por fim o diagrama de inferência *fuzzy* ficaria como mostrado na Figura 20.

Figura 20 – Diagrama de inferência *Fuzzy*



Fonte: Adaptado de Mathworks: apply Fuzzy operator [2000-]. (<https://www.mathworks.com/help/fuzzy/fuzzy-inference-process.html#FP347>).

A partir deste diagrama pode-se ver que a regra 3 está tendo a maior influência na saída.

4.7 ANÁLISE MULTICRITÉRIO

Para Lachtermacher (2009, p. 4), a tomada de decisão pode ser considerado como o processo de identificação de um problema ou de uma oportunidade e a seleção de uma linha de ação para resolvê-lo.

Ainda para o mesmo autor, vários fatores afetam a tomada de decisão, entre eles:

- Tempo disponível para a tomada de decisão;
- Importância da decisão;
- Ambiente – local onde é tomada a decisão a afeta;
- Certeza ou incerteza e risco - o grau de certeza que se tem sobre os parâmetros;
- Agentes decisores;
- Conflito de interesses.

Esses fatores afetam o processo de decisão, pois em muitos casos, o resultado esperado é aquele que satisfaz um conjunto de objetivos (portanto análise de diversas variáveis), nos quais os tomadores de decisão desejam alcançar. Esse tipo de escolha, com mais de um aspecto a ser considerado, é chamado de multicritério, multiatributo ou multiobjetivo (GOMES et al.¹⁰, 2002, apud CAVALCANTE; ALMEIDA, 2005; ENSSLIN et al., 2010).

Segundo Zambon, (2005), entende-se por critérios, atributos que podem ser avaliados ou quantificados e que auxiliam a decisão. A busca da solução de um problema geralmente ocorre em um ambiente onde os critérios são conflitantes, ou seja, quando um critério ganha poderá haver perda em um outro (SENTHIL; SRIRANGACHARYULU; RAMESH, 2014).

Há vários métodos de decisão multicritério. A decisão multicritério tem por finalidade analisar várias possíveis ações levando em conta vários critérios simultaneamente (BILICH; SILVA, 2006). Mas se consolidou como instrumento a partir dos trabalhos de

¹⁰ GOMES, L.F.A.M; GOMES, C.F.S.; ALMEIDA, A.T. Tomada de Decisão Gerencial: Enfoque Multicritério. Editora Atlas, Rio de Janeiro. 2002.

Keeney¹¹, (1992, apud ENSSLIN et al., 2010) ao reconhecer que os atributos (objetivos, critérios) são específicos ao tomador de decisão em cada contexto.

Os modelos baseados em decisão multicritério são indicados para problemas com vários critérios de avaliação. Alguns autores fazem uma decomposição hierárquica do conjunto de ações possíveis, dividindo-o em categorias predefinidas: melhores ações, piores ações e ações para reconsideração (ZAMBON et al., 2005). E como resultado pretendem encontrar um subconjunto pequeno e restrito de ações satisfatórias, se possível apenas uma ação. Esse conjunto de ações satisfatórias pode, ainda, ser tratado com outras ferramentas de um sistema de apoio à decisão, como simulação e análise de cenários. (ZAMBON et al., 2005).

Várias abordagens de decisão multicritérios foram propostas para resolver os vários problemas de logística reversa. Meade et al. (2007) aplicaram o processo de rede analítica (ANP) para selecionar o melhor provedor de logística reversa de serviços terceirizados.

A maioria dos estudos sobre a logística reversa focam na localização da instalação, alocação de recursos, fluxos e projeto de rede (SENTHTIL SRIRANGACHARYULU; RAMESH, 2014). Um modelo de decisão de preços para uma cadeia de abastecimento foi considerado por Ho et al. (2012). Já Lee, Gen e Rhee, (2009), Lau e Wang (2009) aplicaram o método Delphi para diferenciar os critérios para avaliação de fornecedores. Um modelo de programação matemática que minimiza o custo total de processamento de vários tipos de resíduos de produtos elétricos e eletrônicos foi apresentado por Santos e Marins (2015). Efendigil, Onut e Kongar (2008) usaram rede neural artificial e Processo Analítico Hierárquico (AHP) *fuzzy* para selecionar o fornecedor de logística reversa. Pochampally e Gupta (2008) usaram processo hierárquico analítico (PHA) *fuzzy* em uma cadeia de fornecimento reversa para selecionar o produto mais econômico a reprocessar e identificar as potenciais instalações de recuperação. O processo PHA foi utilizado por Ravi, Shankar e Tiwari (2005) para avaliar alternativas para computadores ao final da vida útil, analisando diversos fatores econômicos, não-econômicos e fatores tangíveis intangíveis.

¹¹ Keeney, R.L. (1992). Value-focused thinking: a path to creative decisionmaking. Harvard University Press, London.

5 PROCESSO HIERÁRQUICO ANALÍTICO (PHA)

Um dos desafios mais importantes na gestão de resíduos sólidos e da logística reversa é a seleção de locais para de aterros sanitários ou estações de tratamento. Devido aos parâmetros sociais, ambientais e técnicos relacionados a eles, sua seleção é um processo complexo e depende de vários critérios regulamentadores.

As decisões estratégicas dependem de vários fatores conflitantes, como a decisão de localização de aterro sanitários, precisam ser alocados distantes de áreas urbanas mas também deve-se observar a mínima distância de transportes da área produtora para o aterro (BESKESE et al., 2015). Para uma adequada seleção, um tomador de decisão deve ter uma diversidade de critérios e fatores em relação às decisões.

Para Saaty, (1977¹², apud REZAEI, 2015, p.771), o processo hierárquico analítico é um método baseado em comparação em pares.

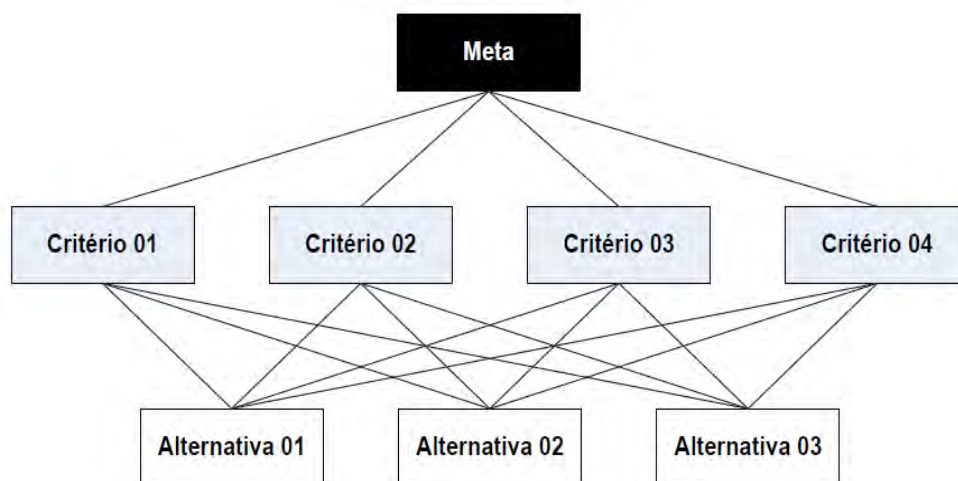
Já para Vargas (2010):

A programação multicritério por meio do *Analytic Hierarchy Process* (AHP) é uma técnica estruturada para tomada de decisão em ambientes complexos em que diversas variáveis ou critérios são considerados para a priorização e seleção de alternativas ou projetos (VARGAS, 2010, p. 5).

O PHA foi desenvolvido na década de 1970 por Thomas L. Saaty. Atualmente é aplicado para a tomada de decisão em diversos cenários complexos, em que pessoas trabalham em conjunto para tomar decisões e onde percepções humanas, julgamentos e consequências possuem repercussão de longo prazo (KAHRAMAN; CEBECI; ULUKAN, 2003).

A utilização do PHA se inicia pela decomposição do problema em uma hierarquia de critérios mais facilmente analisáveis e comparáveis de modo independente, como mostra a Figura 21 (VARGAS, 2010).

¹² Saaty, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures." *Journal of Mathematical Psychology*, v.15, n.3, p. 234-281, 1977.

Figura 21 – Exemplo de hierarquia de critérios

Fonte: Vargas (2010, p. 5).

A partir do momento em que essa hierarquia lógica está construída, os tomadores de decisão avaliam sistematicamente as alternativas por meio da comparação, de duas a duas, dentro de cada um dos critérios. Bevilacqua et al. (2004), também afirma que a essência do processo AHP é a decomposição de um problema complexo em uma hierarquia de critérios e subcritérios em níveis e sub-níveis.

Essa comparação pode utilizar dados concretos das alternativas ou julgamentos humanos como forma de informação subjacente (SAATY, 2008).

O AHP transforma as comparações em valores numéricos que são processados e comparados. O peso de cada um dos fatores permite a avaliação de cada um dos elementos dentro da hierarquia definida. Essa capacidade de conversão de dados empíricos em modelos matemáticos é o principal diferencial do PHA com relação a outras técnicas comparativas (VARGAS, 2010).

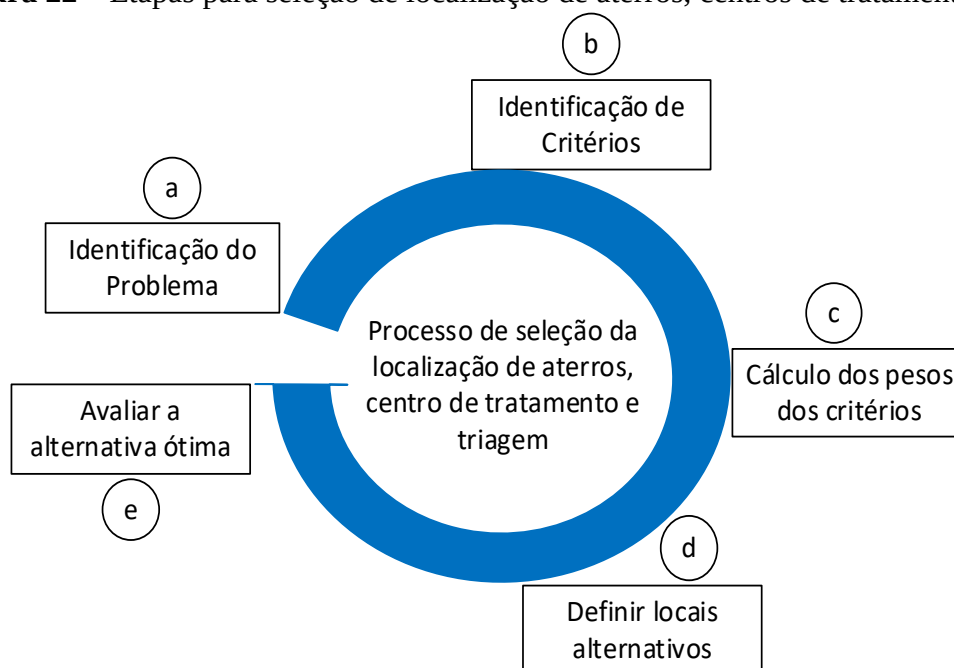
A partir do momento em que todas as comparações foram feitas e os pesos relativos entre os critérios a serem avaliados foi estabelecido, a probabilidade numérica de cada uma das alternativas é calculada. Essa probabilidade determina a probabilidade que a alternativa tem de atender a meta estabelecida. Quanto maior a probabilidade, mais aquela alternativa contribui para a meta final (VARGAS, 2010).

O problema de localização é um processo de tomada de decisão composto por diferentes passos. Muitas abordagens para a seleção da localização do aterro, de um centro de tratamento, de uma planta industrial consistem em cinco etapas principais, ou seja, (a) definição do problema; (b) identificação de critérios que serão utilizados para avaliar e classificar as alternativas de localização; (c) calcular pesos de critérios; (d) definir locais

alternativos; (e) avaliar os locais alternativos e tomar uma decisão Stevenson (1993¹³, apud HANINE et al., 2016), conforme apresentado na Figura 22. O objetivo do primeiro passo é esclarecer o problema em questão, o que pode significar a seleção da localização ideal para o aterro sanitário. Nesse caso, selecionar nova localização dependendo do número de critérios e locais alternativos pode ser muito grande.

Portanto, essa situação requer técnicas de tomada de decisão capazes de avaliar simultaneamente múltiplas alternativas.

Figura 22 – Etapas para seleção de localização de aterros, centros de tratamento e triagem.



Fonte: Adaptado de Hanine et al. (2016).

A partir da montagem da hierarquia, os critérios precisam ser avaliados dois a dois, visando determinar a importância relativa entre eles e seu peso relativo na meta global.

A comparação entre dois elementos utilizando o AHP pode ser realizada de usando a escala de relativa importância proposta por Saaty (2005¹⁴ apud VARGAS, 2010), a qual é a mais amplamente utilizada. Atribuindo valores que variam entre 1 a 9, a escala determina a importância relativa de uma alternativa com relação a outra, conforme apresentado na Tabela 2 (VARGAS, 2010).

¹³ Stevenson WJ Production/operations management, 4th edn. Richard D. Irwin Inc., Homewood. 1993.

¹⁴ SAATY, T. L. Theory and Applications of the Analytic Network Process: Decision Making with Benefits, Opportunities, Costs, and Risks. Pittsburgh: RWS Publications. 2005.

Tabela 2 – Escala de relativa importância de Saaty

ESCALA	AVALIAÇÃO NUMÉRICA	RECÍPROCO
Extremamente preferido	9	1/9
Muito forte a extremo	8	1/8
Muito fortemente preferido	7	1/7
Forte a muito forte	6	1/6
Fortemente preferido	5	1/5
Moderado a forte	4	1/4
Moderadamente preferido	3	1/3
Igual a moderado	2	1/2
Igualmente preferido	1	1

Fonte: Vargas (2010).

Usualmente procura-se utilizar os números ímpares da tabela para assegurar razoável distinção entre os pontos da medição (VARGAS, 2010). O uso dos números pares só deve ser adotado quando existir a necessidade de negociação entre os avaliadores e quando o consenso natural não for obtido, gerando a necessidade de determinação de um ponto médio (SAATY, 1980¹⁵, apud SANTOS; MARINS, 2015). O próximo passo é construir a matriz de comparação, conforme apresenta a Tabela 3.

Tabela 3 - Matriz de comparação (supondo que critério 1 domina o critério 2)

	CRITÉRIO 1	CRITÉRIO 2
CRITÉRIO 1	1	Avaliação numérica
CRITÉRIO 2	1/Avaliação numérica (Recíproco)	1

Fonte: Vargas (2010)

Para interpretar e dar os pesos relativos a cada critério, é necessário normalizar a matriz comparativa. A normalização é feita pela divisão entre cada valor da planilha com o total de cada coluna, como mostra o exemplo dado por Vargas (2010), nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Matriz comparativa normalizada do grupo de critérios

	CRITÉRIO 1	CRITÉRIO 2	CRITÉRIO 3	CRITÉRIO 4
CRITÉRIO 1	1	1/5	1/9	1
CRITÉRIO 2	5	1	1	5
CRITÉRIO 3	9	1	1	5
CRITÉRIO 4	1	1/5	1/5	1
TOTAL	16	2,40	2,31	12

Fonte: Adaptada de Vargas (2010).

¹⁵ SAATY, T. L. The Analytic Hierarchy Process. New York: McGraw-Hill International. 1980

Tabela 5 – Resultado da matriz comparativa normalizada

	CRITÉRIO 1	CRITÉRIO 2	CRITÉRIO 3	CRITÉRIO 4
CRITÉRIO 1	1/16 = 0,063	0,083	0,048	0,083
CRITÉRIO 2	5/16 = 0,313	0,417	0,433	0,417
CRITÉRIO 3	9/16 = 0,563	0,417	0,433	0,417
CRITÉRIO 4	1/16 = 0,063	0,083	0,087	0,083

Fonte: Adaptada de Vargas (2010).

A determinação da contribuição de cada critério na escolha do local é calculada a partir do vetor de prioridade. Esse vetor apresenta os pesos relativos entre os critérios e é obtido através da média aritmética dos valores de cada um dos critérios, conforme apresentado na Tabela 6. Observa-se que o somatório dos valores do vetor sempre totaliza 1 (um).

Tabela 6 – Cálculo do vetor Principal

	Vetor Principal (cálculo)	Vetor Principal
CRITÉRIO 1	$(0,063+0,083+0,048+0,083)/4 = 0,0693$	0,0693(6,93%)
CRITÉRIO 2	$(0,313+0,417+0,433+0,417)/4$	0,3946 (39,46%)
CRITÉRIO 3	$(0,563+0,417+0,433+0,0417)/4$	0,4571 (45,71%)
CRITÉRIO 4	$(0,063+0,083+0,087+0,083)/4$	0,0789 (7,89%)

Fonte: Adaptada de Vargas (2010).

Os valores encontrados para o vetor de principal determinam a participação ou o peso daquele critério no resultado total da meta. Por exemplo, no caso o critério 3 têm um peso de 45,71% da meta total. O próximo passo do processo é verificar a inconsistência dos dados, por meio do índice de consistência (CI). É calculado por meio do somatório do produto de cada elemento do vetor de Principal pelo total da respectiva coluna da matriz comparativa original.

A Tabela 7 apresenta o cálculo do Vetor máximo ($\lambda_{\max}$).

Tabela 7 – Cálculo do Vetor Máximo

Vetor Principal	0,0693	0,3946	0,4571	0,0789
Total	16	2,40	2,31	12
Valor Principal $\lambda_{\max}$	$[(0,0693*16)+(0,3946*2,40)+ 0,4571*2,31)+(0,789*12)] = 4,0585$			

Fonte: Adaptada de Vargas (2010).

O cálculo do índice de consistência (SAATY, 2005) é dado pela seguinte equação:

$$CI = \frac{\gamma_{max} - n}{n - 1} \quad (8)$$

Sendo CI o índice de consistência e n é o número de critérios avaliados. Para o exemplo dado, o índice de consistência (CI) é

$$CI = \frac{4,0585 - 4}{4 - 1} = 0,0195$$

Para verificar se o índice de consistência (CI) é adequado, Saaty, (2005 apud VARGAS, 2010) propôs o cálculo da taxa de consistência (CR). Ela é determinada pela equação (8), a matriz será considerada consistente se a razão for menor que 10%.

$$CR = \frac{CI}{RI} < 0,1 \sim 10\% \quad (9)$$

O valor do Índice de Consistência Aleatória (RI) é fixo e tem como base o número de critérios avaliados, conforme a Tabela 8.

Tabela 8 - Tabela de índices de consistência aleatória (RI) (SAATY, 2005)

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Saaty (2005, apud Vargas, 2010, p. 10).

O valor de CR para o exemplo será:

$$CR = \frac{0,0195}{0,9} = 0,02168 = 2,168\%$$

Como o valor é menor que 10% a matriz de comparação pode ser considerada consistente.

O planejamento e o projeto da rede de coleta seletiva envolve a seleção de pontos de coleta, centros de triagem ou transbordo, de tratamento, quantidade de resíduos gerado, rotas e custos de transporte (YESILNACAR; CETIN, 2005). E conseqüentemente muitos critérios são envolvidos, como distância de áreas residenciais, distância de rodovias, distância aos centros coletores, investimentos em equipamentos, distância de áreas de preservação permanente, apoio da sociedade, entre outros fatores econômicos, sociais e ambientais.

Embora o PHA tenha sido amplamente utilizado para resolver problemas multicritério para tomada de decisão, sua desvantagem mais importante é que não lida com decisões de incerteza quando compara os atributos (HANINE et al., 2016). Todas as

comparações durante PHA pode não incluir uma certeza. Nesta condição, variáveis linguísticas, e a função *fuzzy* triangular pode ser usado para decidir a prioridade de uma variável de decisão sobre outra. (ÖZDAĞOĞLU; ÖZDAĞOĞLU, 2007).

6 SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (GIS)

Um sistema de Informação Geográfica é considerado uma ferramenta que possibilita a manipulação e criação de mapas, e a análise geoespacial, entre outras características. Foi utilizado para auxiliar na definição dos principais locais que poderiam servir de pontos de coleta e tratamento neste trabalho.

O SIG em si não apresenta respostas prontas. É somente uma ferramenta auxiliar para descrever e inferir, deve ser usado somente depois que o problema ambiental estiver delimitado, para daí se verificar a possibilidade de solução (MIRANDA, 2010).

Bonham-Carter¹⁶ (1994 apud CARVALHO, 2010) define um modelo em SIG como “um processo de combinar um conjunto de mapas de entrada através de uma função que gera um mapa de saída”.

Câmara et al. (2001) destacam que a principal proposta de um projeto desenvolvido em SIG é a combinação de dados espaciais, cadastro urbanos e rurais, imagens de satélite, modelos numéricos de terreno numa única base de dados com a finalidade de analisar as combinações e, por meio de modelos, fornecer dados que apoiem a tomada de decisão.

6.1 CONCEITUAÇÃO

Para Miranda (2010), houve uma evolução nas últimas décadas na manipulação de informações geográficas por computador, e o contexto da sua definição também mudou à medida que o uso destes sistemas evoluíram. O Sistema de informação geográfica (SIG) evolui abrangendo diferentes campos de pesquisa, e não seguiu uma sequência lógica.

O desenvolvimento de SIG se deu por intermédio de um conjunto de interações, ocorreu a partir de uma combinação de conceitos, ideais, práticas, terminologia e descrições trazidas por pesquisadores de diferentes áreas (MIRANDA, 2010).

As definições de uma SIG são controversas, as dificuldades de se conceituar se relacionavam com a existência de maneiras diferentes de definir e classificar objetos e objetivos (MIRANDA, 2010; PINTO, 2009). Percebe-se, portanto, que as definições são condicionadas pelo ambiente em que surgiram e pelos problemas que ajudavam a resolver (PINTO, 2009).

¹⁶ BONHAM-CARTER, G. F. Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS. Ontario: Pergamon, 1994. 1. ed. 398 p.

Para Burrough, (1986¹⁷, apud CÂMARA et al., 2001):

Um SIG é constituído por um conjunto de "ferramentas" especializadas em adquirir, armazenar, recuperar, transformar e emitir informações espaciais. Esses dados geográficos descrevem objetos do mundo real em termos de posicionamento, com relação a um sistema de coordenadas, seus atributos não aparentes (como a cor, pH, custo, incidência de pragas, etc) e das relações topológicas existentes. Portanto, um SIG pode ser utilizado em estudos relativos ao meio ambiente e recursos naturais, na pesquisa da previsão de determinados fenômenos ou no apoio a decisões de planejamento, considerando a concepção de que os dados armazenados representam um modelo do mundo real. (BURROUGH, 1986, apud CÂMARA, et al. 2001, p.4.)

Foi definido por Aronoff (1989¹⁸, apud CÂMARA et al., 2001) como “Conjunto de procedimentos, manual ou automatizado, utilizados no sentido do armazenamento, e manipulação de informação georreferenciada”.

Já Cowen (1988¹⁹, citado por PINTO, 2009) definiu SIG em função do problema a resolver, ou seja, como “Sistema de apoio à decisão envolvendo integração de informação georreferenciada num ambiente de resolução de problemas”.

Chrisman (1997²⁰, apud MIRANDA, 2010) apresenta a definição que é consenso entre muitos especialistas, envolve tudo que faz parte do ambiente de um SIG:

Sistema de Informação Geográficas – um sistema de computadores e periféricos, programas, dados, pessoas, organizações e instituições com o propósito de coletar, armazenar, analisar e disseminar informações sobre áreas da Terra. (CHRISMAN, 1997, p. 53, apud MIRANDA, 2010, p. 24)

Mas há ainda as definições de vários autores de SIG como um sistema informatizado, e definem SIG como um sistema de computador que coleciona, edita, integra e analisa informação relacionada à superfície da terra, ou ainda um conjunto de programas de computador contendo 4 subsistemas: 1) entrada de dados; 2) armazenamento e recuperação de dados; 3) manipulação e análise de dados espaciais e 4) saída (MIRANDA, 2010).

Como apresentado por Pinto (2009) as definições são condicionadas pelo ambiente em que surgem e pela realidade dos problemas que ajudam a resolver, como mostra a Figura 23.

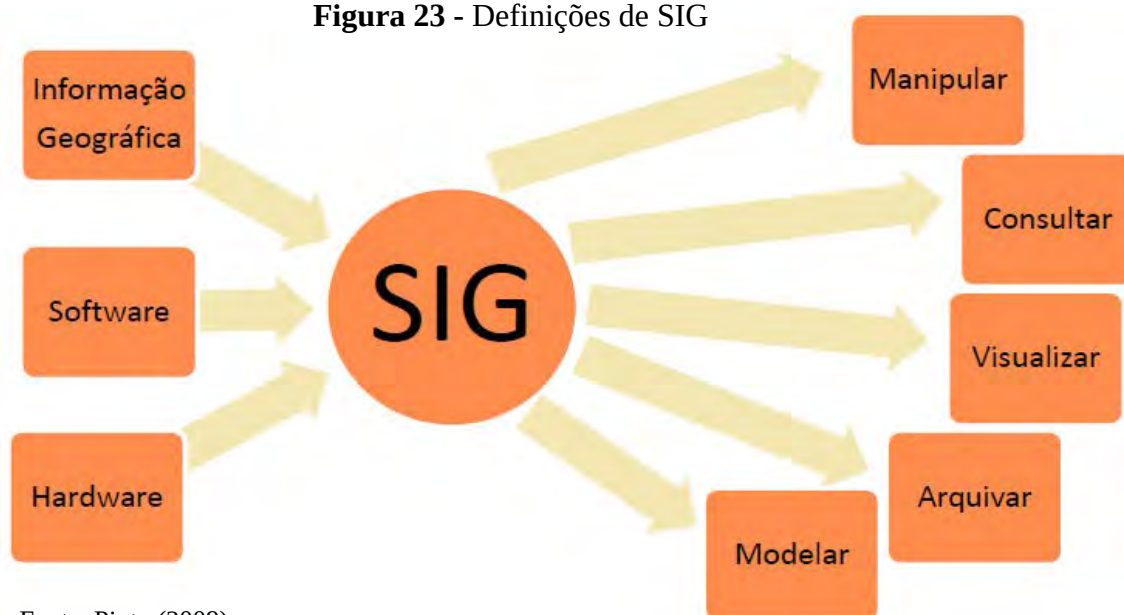
¹⁷ BURROUGH, P.A. Principles of geographical information systems for land resource assessment. Oxford:Oxford University Press, 1986.193p.

¹⁸ Aronoff, Stanley. Geographic Information Systems: A Management Perspective. Universidade Northwestern. WDL Publications, 1989, 294p.

¹⁹ COWEN, D.J. GIS versus CAD versus DBMS: what are the differences. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. v. 54, p. 1551-1554, 1988.

²⁰ CHRISMAN, N.R. Exploring geographic information system. New York: J.Wiley,1997, 298p.

Figura 23 - Definições de SIG



Fonte: Pinto (2009).

Em outra definição, os SIG são considerados uma ferramenta que permite manipular dados georeferenciados e alfanuméricos para, a partir de análises espaciais, apoiar a tomada de decisão, como por exemplo, a definição do melhor roteiro de entregas a ser seguido (FARKUH NETO; LIMA, 2006²¹, apud OLIVEIRA, 2011, p. 35).

Os Sistemas de Informações Geográficas são *software* que fornecem armazenagem, recuperação, análise, visualização e criação de mapas com capacidades para informações espaciais, como um conjunto (rede) de caminhos (ruas), informações territoriais, localização de informações censitárias etc. (MIRANDA, 2010).

Já para Robaina²² et al. (2009, apud OLIVEIRA, 2011):

Os SIGs se caracterizam por permitir ao usuário, a realização de operações complexas de análises sobre dados espaciais. Um sistema de informação geográfica pode manipular dados gráficos e não gráficos, permitindo a integração de informações para análise e consulta de informações geográficas. Um exemplo seria a localização de uma viatura policial através da posição geográfica (ROBAINA et al. 2009 apud OLIVEIRA, 2011, p. 35).

Para Zis, (2012) um SIG separa as informações em diferentes camadas temáticas (*layers*) e armazena-as independentemente, possibilitando assim a criação de mapas temáticos. Ou seja, possui uma ferramenta de criação de camadas chamada *layers*, onde os dados geográficos do mapa temático são georeferenciados por coordenadas (ZIS, 2012, p.

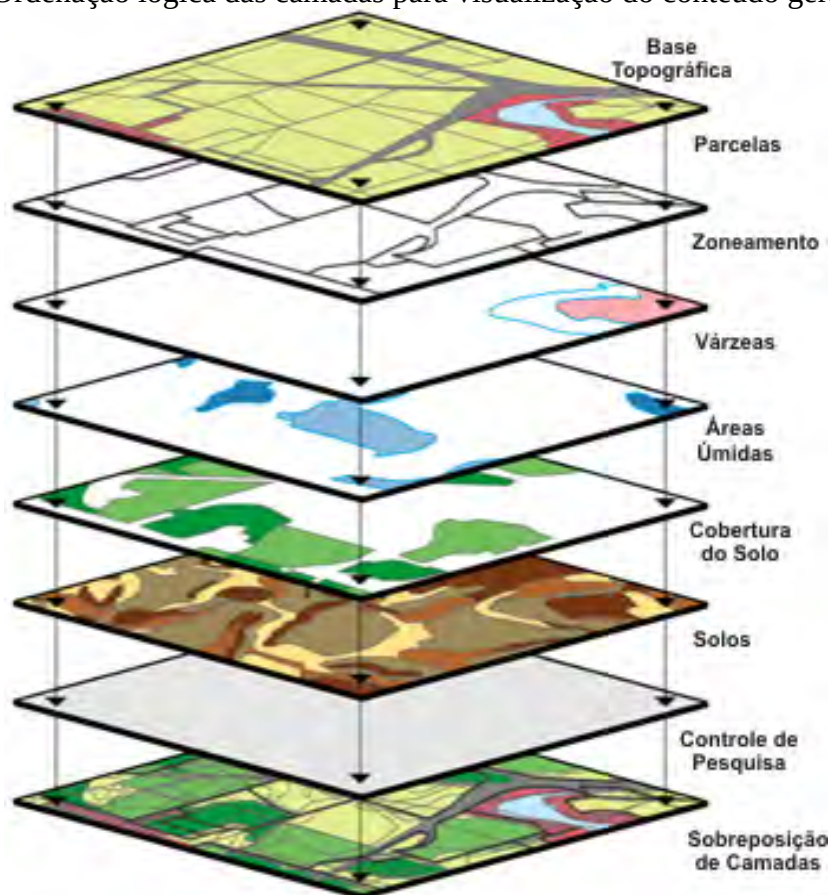
²¹ FARKUH NETO, A.; LIMA, R. S. **Roteirização de veículos de uma rede atacadista com o auxílio de sistemas de informações geográficas (SIG)**. Revista Pesquisa e Desenvolvimento Engenharia de Produção, n.5, p. 18-39, Jun 2006.

²² ROBAINA, L. E. D.; TRENTIN, R.; NARDIN, D.; CRISTO, S. S. V. Método e Técnicas Geográficas Utilizadas na Análise e Zoneamento Ambiental. **Geografias**, v. 5, n. 2, jul./dez., p. 36-49, 2009.

32). Cada camada contém um tipo diferente de informação mas permite que o usuário execute a sobreposição dessas camadas (*overlay*) através da posição e topologia dos objetos, a fim de gerar novas informações (FITZ, 2008²³ apud OLIVEIRA, 2011, p. 39).

A Figura 24 apresenta a sobreposição das camadas.

Figura 24 – Ordenação lógica das camadas para visualização do conteúdo geral do mapa



Fonte: Ministério dos Transportes [200-].

Os objetos do mundo real são descritos por meio de atributos, que podem ser do tipo espacial, temporal ou temático. Os atributos espaciais contêm valores referente a localização de objetos, topologia e entidades. Já os temporários definem valores referentes a informações relacionadas as datas dos objetos e a frequência de aquisição. E os atributos temáticos, representam os demais objetos como tipo de solo (MIRANDA, 2010).

Em SIG, topologia é um conjunto de regras e comportamentos que se estipulam como pontos, linhas e polígonos e partilham geometrias coincidentes.

²³ FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

6.2 DADOS GEOGRÁFICOS OU GEOESPACIAIS

Para Galati²⁴, (2006 apud ZIS, 2012):

Os dados geoespaciais ou geográficos são dados brutos provenientes de locais físicos e possuem características de superfície da Terra ou próximas a superfície. Estes dados geoespaciais descrevem características do mundo real e estão relacionados a posições no espaço terrestre. Esta posição conhecida como coordenada geográfica define uma posição no eixo (x,y) para o dado em referência ao espaço a que ocupa. Os dados descrevem as características por meios das propriedades relacionadas a objetos que possuem atributos e que possam ter relação com outros dados, em caso de análise de múltiplos dados de uma mesma área ou região (GALATI, 2006 apud Zis, 2012, p. 35).

Os dados geográficos contêm, basicamente, dois tipos de informações: a espacial (descreve o formato do objeto geográfico) e a alfanumérica (contém as características não-espaciais dos objetos) (OLIVEIRA, 2011). Podem ser:

1. Convencionais - ajudam a descrever características existentes no objeto espacial. Contém atributos como nome da rua, número do lote, quantidade de habitantes etc.;
2. Espaciais - são caracterizados pela localização geográfica sobre a superfície terrestre em certo instante. Dados espaciais são modelados para representar uma área ou polígono, linha, ponto ou algum objeto complexo, como por exemplo, uma rede de esgoto ou malha rodoviária. Este tipo de dado é armazenado através de um sistema de coordenadas (x,y) ;
3. Pictóricos – são figuras armazenadas no banco de dados usadas na exibição de alguma área, como, por exemplo, imagem de satélite ou de um mapa.

Com esses dados é possível saber o posicionamento de um objeto em relação ao objeto geográfico, bem como sua vizinhança, distância de outros objetos, propriedades de medidas e atributos temáticos. O mundo real pode ser representado em forma de imagem, *raster* ou de vetores (SILVA, 2004)

O SIG apresenta dois tipos de estruturas de dados:

1. **Estruturas matriciais:** também chamada de *raster* ou matricial (matriz composta por linhas e colunas) este tipo de estrutura tem seus valores associados a uma matriz de células. Cada célula é um endereço identificado por coordenadas de linhas e colunas representando o mundo real, como exemplificado na Figura 25 (SILVA, 2004).

²⁴ GALATI, S. R. **Geography Informations System Semystified**. Norwood: ARTECH HOUSE, INC, 2006.

Figura 25 - Representação de um mapa do mundo real via estrutura matricial ou *raster*



Fonte: Silva (2004).

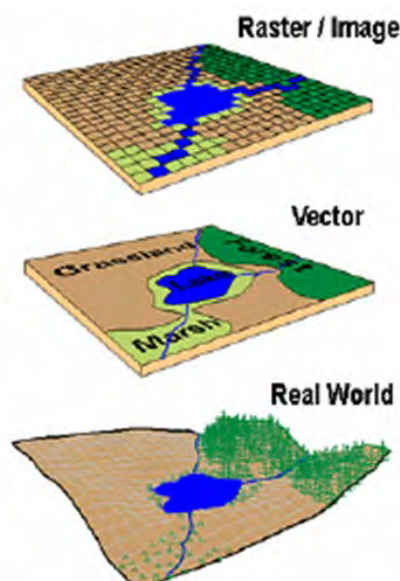
2. **Estruturas vetoriais** (formado por pontos, linhas e polígonos): representam mapas através de coordenadas x e y , ou longitude e latitude, onde os símbolos do mundo real são localizados por pontos, linhas e polígonos, como está sendo exemplificado na Figura 26 (SILVA, 2004). A Figura 27 traz as representações raster, vetorial e mundo real.

Figura 26 - Representação de um mapa do mundo real por meio de estrutura vetorial



Fonte: Pinto (2009).

Figura 27 – Representações em *raster*, vetor e mundo real



Fonte: Pinto (2009).

Para Câmara et al. (1998), uma característica básica de SIG é sua capacidade de tratar as relações espaciais (vizinhança, proximidade, pertinência) entre os objetos geográficos. Armazenar a topologia de um mapa é uma das características básicas que diferenciam um SIG de um sistema CAD. A outra diferença é a capacidade de tratar as diversas projeções cartográficas.

6.3 IMPORTÂNCIA DO SIG

O SIG ajuda o profissional na tomada de decisão, pois fornece por meio de localização, rotas, simulações, dados para resolver o problema encontrado no mundo real. A Figura 28 apresenta o ciclo de dados do SIG.

Figura 28 – Ciclo do SIG



Fonte: Pinto (2009).

O SIG apresenta uma série de possibilidades de aplicação, entre elas:

1. Facilidade de trabalhar com uma grande quantidade de informação;
2. Tempo de resposta em tempo real no apoio à decisão;
3. Fácil gestão e armazenamento de dados geográficos;
4. Rapidez com que a informação pode ser atualizada;

5. Aplicação nas diversas áreas de estudo como Engenharias, Informática, Ciências Ambientais, Agricultura, Planejamento Urbano, Meteorologia, entre outros;
6. Gestão de Planos Municipais de Ordenamento do Território;
7. Inventariação dos Recursos Naturais;
8. Gestão de Infraestruturas;
9. Otimizar localizações,
10. Cadastro (MIRANDA, 2010).

6.4 SIG E PHA

Muitos trabalhos concluíram que o PHA é útil e prático para a seleção de locais para aterro sanitário e equipamentos para coleta e tratamento de resíduos (MOHAMED et al., 2016). No entanto, na prática, os dados são muitas vezes inadequados para modelar muitas situações, uma vez que os julgamentos humanos são, na maioria das vezes, vagos. Para superar as deficiências, o método PHA tem sido combinado com a análise do sistema de informação geográfica (SIG) e lógica fuzzy, a fim de determinar locais adequados para construção de aterros sanitários, e tem se apresentado como uma ferramenta eficaz e bem-sucedida.

O SIG tem sido amplamente usado para selecionar locais para aterros sanitários, porque armazenam dados eficientemente, analisam e disponibilizam informações de acordo com as especificações definidas, como apresentado no estudo de Charnpratheep, Zhou e Garner (1997), Kao, Lin e Chen (1997) e Sener, Zen e Doyuran (2006).

Vários autores têm usado o processo de análise de decisão multi-critérios, AHP, combinado com a análise do sistema de informação geográfica, para determinar locais adequados para construção de aterros sanitários.

Siddiqui, Everett e Vieux (1996) foram os primeiros a combinar sistema de informações geográficas (SIG) e procedimento AHP para auxiliar na seleção de aterros sanitários municipais.

Da mesma forma, Charnpratheep, Zhou e Garner et al. (1997) utilizou teoria de conjuntos difusos com GIS para a triagem de aterros na Tailândia. Harlingen, Nema e Gupta (1999) propuseram uma formulação melhorada baseada em multiobjetivo de programação inteira para alcançar a configuração ideal de um sistema regional de gestão de resíduos perigosos. Ishizaka e Tanaka (2003) discutiu o assunto da comunicação de risco para o gerenciamento de resíduos e local de descarte no Japão. Mahini e Gholamalifard (2006), aplicaram combinação linear ponderada com um SIG para avaliar a adequação da região de

estudo para aterro sanitário. Gemitzi et al., (2007²⁵, apud MOHAMED et al., 2016) resolveram o problema da localização de aterros municipais de resíduos sólidos usando um modelo de decisão multicritério com SIG na Grécia, onde as avaliações de diferentes locais sob vários critérios e os pesos dos critérios foram avaliados por lógica *fuzzy*

Já Wang et al. (2009), apresenta uma abordagem que integra AHP e SIG para selecionar local adequado para o aterro de resíduos sólidos em Pequim, China. Babalola e Busu (2011) consideraram o Processamento Analítico de Rede (ANP) com SIG para a localização de aterros para resíduos sólidos em Damaturu, na Nigéria. Além disso, Demesouka et al. (2013), desenvolveu um modelo multicritério integrado para análise de adequação para localização de aterros sanitários municipais, baseados nos métodos PHA e TOPSIS. A revisão da literatura mostra muitas abordagens que combinam SIG com técnicas de tomada de decisão multicritério.

Dentre os vários tipos de SIG disponíveis no mercado, será usado nesta pesquisa o QGis (QuantumGis), um *software* multiplataforma livre (UNIX, Windows, OSX, Androide) e de código aberto que permite aos usuários visualização de dados, criação de mapas, edição e realização de análise geoespacial.

²⁵ GEMITZI, A., PETALAS, C., TSIHRINTZIS, V.A., PISINARAS, V. Assessment of groundwater vulnerability to pollution: a combination of GIS, fuzzy logic and decision making techniques. Environmental. Geol. 49, 653–673. 2006.

7 METODOLOGIA

A Metodologia é a aplicação de procedimentos e técnicas que devem ser observados para construção do conhecimento, com o propósito de comprovar sua validade e utilidade nos diversos âmbitos da sociedade (PRODANAV; FREITAS, 2013, p. 14).

O conhecimento científico difere dos outros tipos de conhecimento por ter toda uma fundamentação e metodologias a serem seguidas (MARCONI; LAKATOS, 2007)

Assim, ao analisar um fato, o conhecimento científico não apenas trata de explicá-lo, mas também busca descobrir e explicar suas relações com outros fatos, conhecendo a realidade além de suas aparências. Busca chegar à veracidade dos fatos. De acordo com Gil (2010, p. 8): “neste sentido o que torna o conhecimento científico distinto dos demais é que tem como característica fundamental a sua verificabilidade”.

A investigação científica depende de um “conjunto de procedimentos intelectuais e técnicos” (GIL, 2010, p. 8), para que seus objetivos sejam atingidos e é preciso seguir os métodos científicos.

A finalidade da pesquisa é “resolver problemas e solucionar dúvidas, mediante a utilização de métodos científicos” (BARROS; LEHFELD²⁶, 2000, p. 14 apud GIL, 2010, p.10). Para isso, há vários tipos de pesquisas que proporcionam a coleta de dados sobre o que se deseja investigar.

Segundo Marconi e Lakatos (2007, p. 157), a pesquisa pode ser considerada “um procedimento formal com método de pensamento reflexivo que requer um tratamento científico e se constitui no caminho para se conhecer a realidade ou para descobrir verdades parciais’.

Já para Prodanav e Freitas (2013).

Pesquisa é um conjunto de ações, propostas para encontrar a solução para um problema, as quais têm por base procedimentos racionais e sistemáticos. A pesquisa é realizada quando temos um problema e não temos informações para solucioná-lo. A pesquisa procura respostas. Pode-se encontrá-las ou não (PRODANAV; FREITAS, p. 44, 2013)

7.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

A Pesquisa Científica visa conhecer cientificamente um ou mais aspectos de determinado assunto. Esta pesquisa, sob o ponto de vista da sua natureza, foi considerada aplicada, pois permitiu gerar conhecimentos sobre diversos assuntos e aplicá-los para resolver os problemas encontrados e atingir a meta especificada.

²⁶ BARROS, A. J. P. de; LEHFELD, N. A. de. Projeto de pesquisa: propostas metodológicas. 4. ed. Petrópolis, RJ: Vozes, 2000.

Na sua fase inicial, teve como finalidade proporcionar mais informações sobre REEE e rede de recuperação e lógica *fuzzy*, possibilitando a delimitação do tema da pesquisa; e a fixação dos objetivos e a formulação das hipóteses.

Foi considerada também **experimental** pois apresentou como objetivo principal a necessidade de aprofundamento da realidade, por meio da manipulação e do controle de variáveis, para demonstrar o modo ou as causas pelas quais o fato foi produzido (GIL, 2010).

Para se atingir os objetivos desta pesquisa foi necessário o levantamento de dados de várias fontes, os procedimentos técnicos para isso foram feitos por: **documentação indireta**: que envolveu pesquisa documental (fontes primárias) e pesquisa bibliográfica (fontes secundárias) e **documentação direta**: que envolve a **observação direta intensiva** (técnicas de observação e entrevista).

Para aplicar a rede reversa proposta para REEE proposta neste trabalho foi feito um estudo de caso no município de Ilha Solteira, SP. Segundo Gil (2010):

Os estudos de caso são voltados mais para a aplicação imediata de conhecimentos em uma realidade circunstancial, relevando o desenvolvimento de teorias. Consiste no estudo profundo e exaustivo de um ou mais objetos, de maneira que permita seu amplo e detalhado conhecimento. Define-se, também, um estudo de caso da seguinte maneira: “[...] é uma estratégia de pesquisa que busca examinar um fenômeno contemporâneo dentro de seu contexto. (GIL, 2010, p.57).

Quanto a abordagem do problema, esta pesquisa foi considerada quantitativa. Segundo Marconi e Lakatos (2007):

A abordagem quantitativa consiste em investigações de pesquisa empírica cuja principal finalidade é o delineamento ou análise das características de fatos ou fenômenos, a avaliação de programas, ou o isolamento de variáveis principais ou chave. Tem por objetivo a coleta sistemática de dados sobre populações, programas, ou amostras de populações e programas. Considera que tudo pode ser quantificável, o que significa traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisá-las. Requer o uso de recursos e de técnicas estatísticas e matemáticas (MARCONI ; LAKATOS, 2007, p.187).

7.2. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Esta pesquisa foi desenvolvida para um município de pequeno porte que constituiu a base da rede reversa.

A pesquisa descreveu as características dos REEE e de sua rede reversa bem como os processos operacionais relativos ao sistema logístico reverso. Assim, este trabalho se propôs definir uma rede reversa para o ee-lixo com apoio de um SIG, da lógica *Fuzzy* e Processo de Análise Hierárquica (AHP). Os parâmetros e as variáveis de decisão foram definidos a partir das funções e características definidos para a rede reversa, assim como a função *fuzzy* utilizada e os critérios e subcritérios avaliados.

Em função do modelo genérico para rede de recuperação de produtos proposta por Fleischmann (2001) foi definido uma rede reversa para um município de pequeno porte. Para sua aplicação escolheu-se o município de Ilha Solteira, SP, pela facilidade de acesso aos dados necessários para o modelo. A rede municipal consistiu em 3 atividades críticas: (1) coleta, (2) triagem, (3) tratamento. Criou-se então o modelo linear multiobjetivo, com os objetivos de: (1) minimizar o custo total, (2) minimizar a distância entre a estação de triagem e a estação de tratamento; (3) maximizar a distância entre a estação de tratamento e a área urbana.

As configurações de rede do sistema de ee-lixo incluíram características geográficas associadas às atividades relacionadas acima mencionadas. Os critérios e subcritérios foram definidos de acordo com os objetivos que se pretendia alcançar como minimização de custos e de distâncias, entre outros.

7.2.1. Etapas e procedimentos

Para realização da pesquisa foram executadas as etapas a seguir:

1ª Etapa - Definição do modelo multicritério da rede reversa para REEE, lembrando que foi composta de 3 atividades críticas (1) coleta, (2) triagem, e (3) tratamento;

2ª Etapa - Definição do município a ser aplicado o modelo;

3ª Etapa - Aplicação do modelo proposto no município escolhido;

4ª Etapa - Levantamento de Dados (quantidade de REEE produzido, população por bairros, distâncias euclidianas dos bairros aos PEVs, dos PEVs ao Centro de Triagem e deste ao Centro de tratamento)

5ª Etapa - Criação de um banco de dados georreferenciados (SIG);

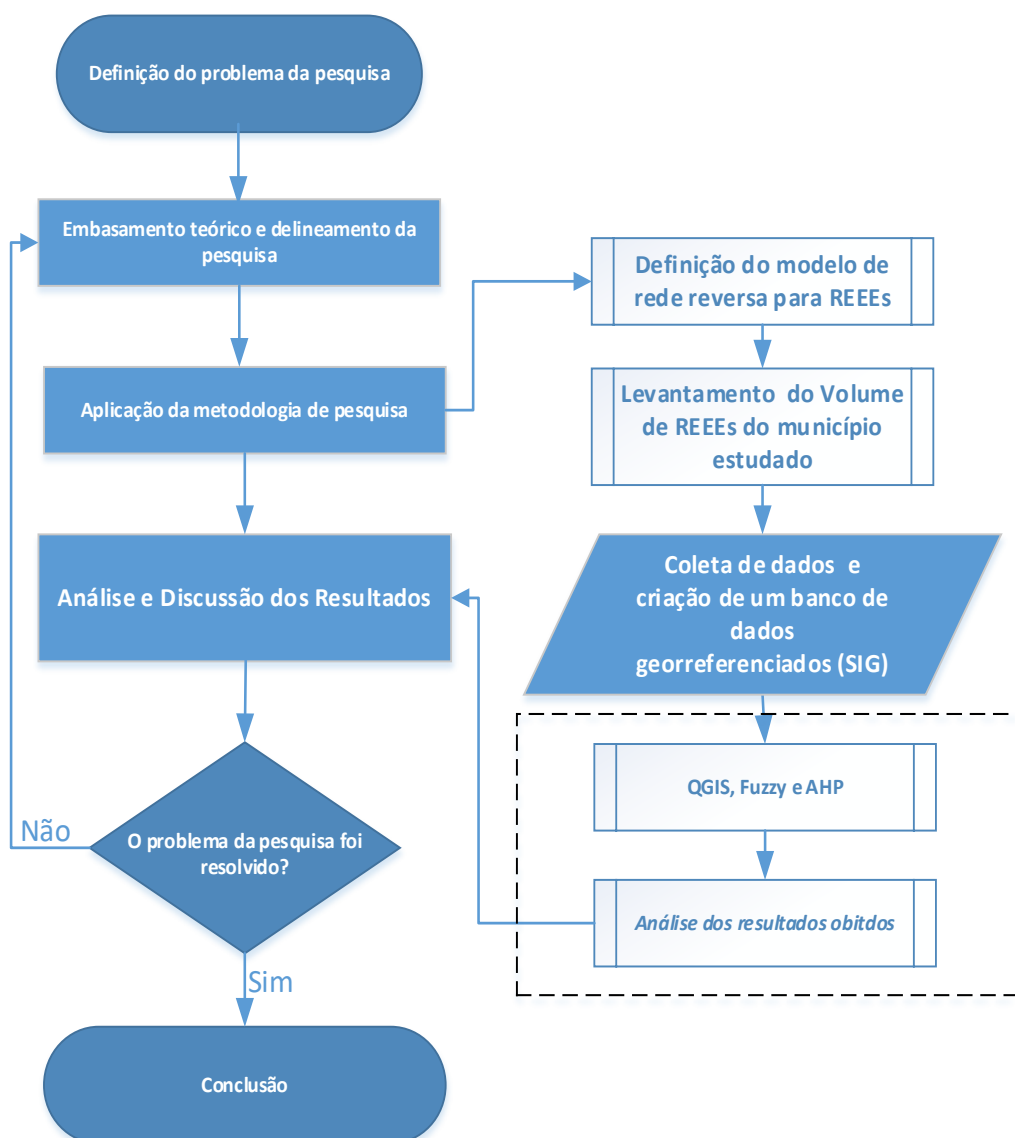
6ª Etapa - Avaliação das informações levantadas;

7ª Etapa - Definição dos critérios, subcritérios e pesos para a análise PHA;

8ª Etapa - Aplicação do sistema de modelagem QGIS, *fuzzy* e PHA;

9ª Etapa - Análise do resultado;

A Figura 29 apresenta o fluxograma da pesquisa.

Figura 29 – Fluxograma da pesquisa

Fonte: Elaborado pela autora

7.3 PROPOSTA DA REDE REVERSA

7.3.1 Definição do problema

Devido às melhorias nos padrões de vida das pessoas e ao rápido desenvolvimento da sociedade, a demanda por equipamentos eletroeletrônicos aumenta a cada ano e, conseqüentemente o retorno e descarte desses produtos. É preciso implementar uma rede efetiva de logística reversa que colete e indique o destino adequado aos bens retornados.

Muitas vezes o município não tem instalações adequadas para pontos de coleta, desmanche e descarte dos REEE. Desta forma, percebe-se a necessidade de criar uma rede de recuperação de eee-lixo.

O custo total da rede de logística reversa foi um importante critério, por isso teve como premissas: os pontos de coleta devem estar próximo ao consumidor que irá descartar o seu REEE, e então transportados para os centros de triagem e, após o desmanche, os produtos serão destinados para Centros de Tratamento (reparo, reciclagem) ou aterros sanitários

Para a rede reversa proposta, algumas suposições foram necessárias como:

- (1) A área de geração de lixo eletrônico foi considerada urbana;
- (2) O custo do transporte foi linearmente proporcional à distância percorrida.
- (3) A taxa de geração de REEE foi constante no período de planejamento.
- (4) Os Pontos de Entrega Voluntária (PEVs) foram definidos com base na menor distância de transporte para os consumidores, menor distância ao centro de Triagem, maior área de cobertura possível, portanto maior quantidade de REEE coletados.
- (5) Existiu uma local que poderá funcionar como estação de triagem;
- (6) Construção de uma estação de tratamento, próxima a de triagem e distante da área urbana, preferencialmente e próxima a malha viária.

As configurações de rede do sistema de ee-lixo incluem características geográficas associadas às atividades relacionadas acima mencionadas, e as suas capacidades em termos das funções específicas que elas fornecem no sistema de logística reversa.

A rede consiste em 3 atividades críticas da coleta seletiva: (1) coleta, (2) transporte e transferência, (3) tratamento. O principal foco da rede reversa do ee-lixo é a integração das atividades e fluxos dentro do sistema.

Para resolver os problemas formulou-se a rede de logística reversa como um modelo de programação multiobjetivos. Para a modelagem matemática é importante lembrar que os objetivos são: (1) minimizar o custo total, incluindo o custo fixo para a abertura da estação de tratamento e melhoria da estação de triagem, ou transbordo e a redução dos custos de

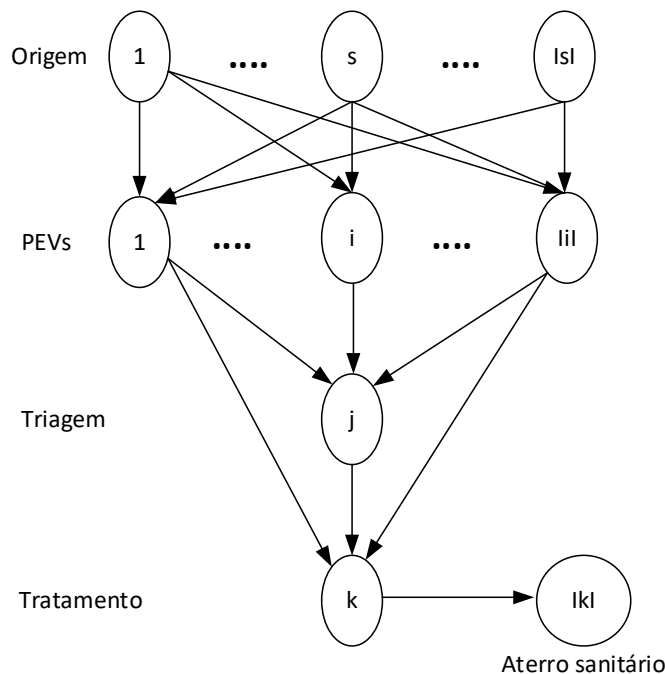
transporte. (2) minimizar a distância entre a estação de triagem e a estação de tratamento; (3) maximizar a distância entre a estação de tratamento e a área urbana.

Os principais problemas a serem abordados por este modelo são os seguintes

- (1) Quais locais devem ser escolhidos para os pontos de coleta?
- (2) Onde localizar a estação de tratamento para maximizar a distância até a área urbana e minimizar a distância da estação de triagem?
- (3) Quantos pontos de coleta serão necessários?
- (4) Qual o custo total da rede reversa?

A rede proposta é mostrada na Figura 30.

Figura 30 – Rede de reciclagem de REEE de um sistema de logística reversa



Parâmetros e variáveis de decisão

Os parâmetros estão definidos como se segue:

$i \in I$: índice para PEVs nos bairros;

$j \in J$: índice para estação de triagem;

$k \in K$: índice para estação de tratamento;

H_i : tamanho da população da área estudada i ;

γ : quantidade de resíduos gerados por dia por pessoa;

G_k : custo fixo para a abertura de estação de tratamento;

M_i : custo fixo para a abertura de ponto de coleta;

F_j : custo fixo associado para melhorias da estação de triagem no local j ;

d_{ij} : distância entre o PEV i e a estação de triagem j ;

d_{jk} : distância entre a estação de triagem j e a estação de tratamento k ;

d_{ik} : distância entre o bairro i e a estação de tratamento k ;

β : custo unitário de transporte por km por quantidade;

D : máxima cobertura da área relacionada aos PEVs.

Variáveis de Decisão:

$$X_j \begin{cases} 1, & \text{se a estação de triagem estiver localizada em } j \\ 0, & \text{se a estação de triagem não estiver localizada em } j \end{cases}$$

$$Z_i \begin{cases} 1, & \text{se ao bairro } i \text{ é destinado um ponto de coleta } i \\ 0, & \text{se ao bairro } i \text{ não é destinado um ponto de coleta } i \end{cases}$$

$$Y_k \begin{cases} 1, & \text{se a estação de tratamento estiver localizada em } j \\ 0, & \text{se a estação de tratamento não estiver localizada em } j \end{cases}$$

7.3.2 Formulação do problema

Antes de desenvolver o modelo de otimização multiobjetiva, foi pressuposto:

- (1) A possibilidade de envio direto de REEE pelo cliente para uma estação de tratamento é descartada;
- (2) Um PEV possui uma capacidade suficiente para receber os REEE.
- (3) Os custos de transporte entre os clientes e o PEVs que se localiza no mesmo bairro são insignificantes devido as curtas distâncias entre eles;
- (4) O plano de localização abrange um horizonte de planejamento dentro do qual nenhuma mudança substancial é incorrida nas demandas dos clientes e na infraestrutura de transporte.

O modelo é formulado abaixo:

$$\min \left\{ \sum_j (F_j X_j) + \sum_i (Z_i M_i) + \sum_k (G_k Y_k) + \beta \left[\sum_i \sum_j (H_i \cdot \gamma \cdot Z_i \cdot d_{ij}) + \sum_j \sum_k (Y_k d_{jk}) \right] \right\} \quad (10)$$

$$\min W \quad (11)$$

$$\max P \quad (12)$$

Sujeito a:

$$Z_{ij} \leq X_j, \forall i \in I, j \in J \quad (13)$$

$$\sum_k d_{ik} Y_k \geq P, \forall i \in I \quad (14)$$

$$w \geq \sum_j d_{jk} X_j, \forall j \in J \quad (15)$$

$$d_{ij} Z_{ij} \leq D \quad (16)$$

$$\sum_k Y_k = 1 \quad (17)$$

$$X_j \in (0,1), \forall j \in J \quad (18)$$

$$Z_{ij} \in (0,1), \forall i \in I, j \in J \quad (19)$$

$$Y_k \in (0,1), \forall k \in K \quad (20)$$

A equação 10 minimiza o custo total incluindo o custo fixo para abrir uma estação de tratamento e custo de transportes. A equação 11 minimiza a distância entre a estação de triagem e de tratamento, como é definido na restrição (15). A equação 12 maximiza a distância entre a a estação de tratamento e a área urbana, como é definido na restrição (14). A restrição (13) garante apenas que um PEV poderá receber os resíduos do bairro que é atribuído a ele, enquanto a restrição (16) determina a área de geração não deve ser atribuído à PEV que não pode cobri-lo. A restrição (17) significa apenas uma estação de tratamento será construída. As restrições (18), (19) e (20) aplicam a restrição sobre a integralidade das variáveis de decisão.

7.4 DEFINIÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DOS PEVS E CENTRO DE TRATAMENTO

7.4.1 Localização dos PEVs

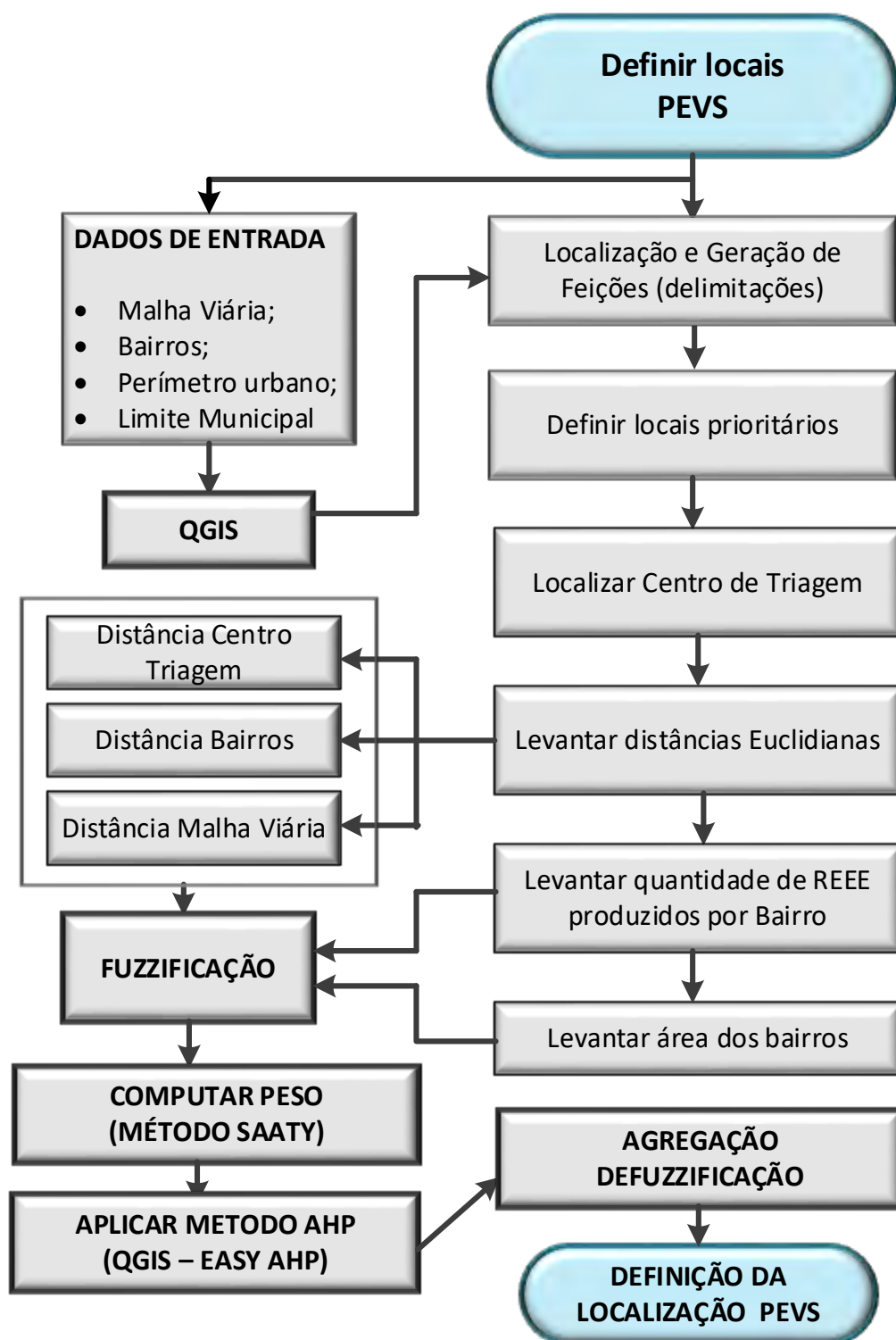
Um sistema de coleta seletiva pode apresentar duas modalidades básicas: os pontos de entrega voluntária e a coleta porta a porta. Dentre os aspectos positivos do emprego dos PEV pode-se dizer que: facilita a coleta, reduzindo custos (aumento na eficiência da coleta) com percursos longos, especialmente em bairros com baixa densidade populacional, evitando trechos improdutivos na coleta porta a porta; entre outros fatores (PEIXOTO; CAMPOS; D'AGOSTO, 2005)

Os pontos de entrega voluntária são caçambas, containers ou conjuntos de tambores, devidamente identificados para receber materiais previamente selecionados pelos geradores dos resíduos. Devem ser instalados em pontos estratégicos, com grande fluxo de pessoas e fácil acesso, inclusive para automóveis.

Para a definição da melhor localização dos Pontos de Entrega Voluntário foram definidos alguns critérios de seleção, baseando nas condições impostas para a rede reversa, ou seja, na construção das hierarquias foram incluídos todos os detalhes relevantes que representam o problema, entre eles a minimização do custo de transporte.

A fim de definir os possíveis locais que poderiam funcionar como pontos de coleta, e de tratamento, optou-se pela análise geoespacial feito no software QGIS e análise hierárquica (AHP) e função triangular *fuzzy*, conforme mostra a Figura 31.

Figura 31 - Fluxograma para definição dos PEVs



Fonte: Elaborado pela autora

Para completar a rede foi preciso definir também a localização do Centro de Triagem e do Centro de Tratamento.

Os centros de triagem são estruturas que recebem os REEE, realizam a separação, triagem e expedição para as recicladoras ou centros de tratamento. Cabe lembrar que o modelo mais inteligente para a definição dos centros de triagem seria a partir de uma otimização da malha logística. Mas normalmente estes centros se localizam em municípios de pequeno porte, em cooperativas de coleta de lixo reciclável.

7.4.2 Localização do centro de tratamento

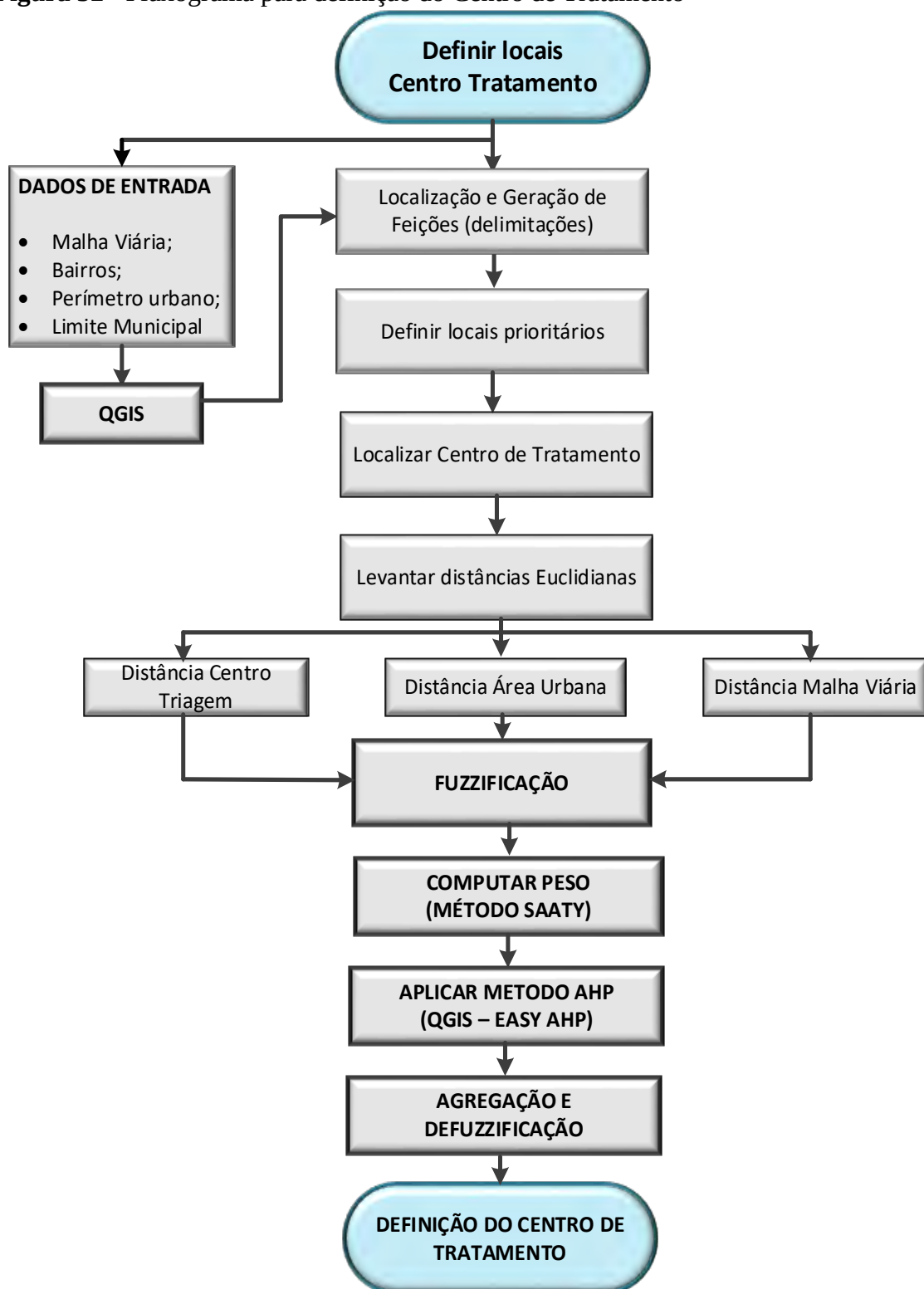
Os centros de tratamento precisam ser localizados em locais de com área mínima de 500m², (PEIXOTO; CAMPOS; D'AGOSTO, 2005), distantes de: áreas urbanas (mínimo 500m), nascentes, rios (mínimo 500m), reservas ecológicas, áreas de preservação permanente, áreas agrícolas evitando, assim, danos ambientais, pois o processamento de REEE pode gerar resíduos perigosos.

Outro fator importante é a distância à malha viária. Segundo Guiqin, et al. (2009), a distância da malha viária não deve exceder 500m, e não deve ser inferior a 100m para que o descarregamento dos REEE não atrapalhe o fluxo da rodovia.

Ao considerar a localização do centro de tratamento é importante observar a proximidade com fontes de produção de resíduos, ou centros de triagem, uma vez que quanto mais próximos aos centros de triagem ou de transbordo menores os custos de transporte.

A Figura 32 apresenta o fluxograma para a definição da localização do centro de tratamento.

Figura 32 - Fluxograma para definição do Centro de Tratamento



Fonte: Elaborado pela autora

7.5 ESTIMATIVA DO VOLUME DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS

O cálculo do volume de REEE surge como uma condição básica e relevante em qualquer estudo ou modelo relativo ao tema. Esse montante influenciará o impacto ambiental

e todo o planejamento para implantar um modelo de logística reversa. Por isso, trata-se de um valor sensível, que deve ser estimado com cautela e cuidado de cuidados.

Montantes subestimados podem sobrecarregar o sistema, onerar a cadeia de forma inesperada e gerar uma sobrecarga na disposição final. Já montantes superestimados podem desorientar a cadeia de reciclagem, diminuir a ocupação da estrutura montada (aumentando os custos) e desestimular os agentes envolvidos.

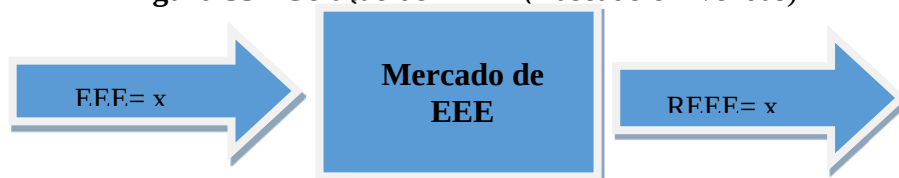
Cinco metodologias para estimativa do volume de REEE foram encontradas na literatura. Para minimizar o nível de incerteza nas estimativas, a metodologia aplicada neste estudo foi selecionada a partir da disponibilidade de informações encontradas no município.

1. Baseado em vendas

Esse método admite que toda venda é uma reposição e gera um resíduo equivalente em peso. Ou seja, se em um ano t , foi vendido X toneladas de um produto, neste mesmo ano serão gerados X toneladas de resíduo do mesmo produto (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA- ABNIEE, 2012).

Pode ser aplicado para grandes equipamentos em mercados saturados e sem crescimento. É um método simples que usa dados de vendas.

Figura 33 - Geração de REEE (Baseado em vendas)

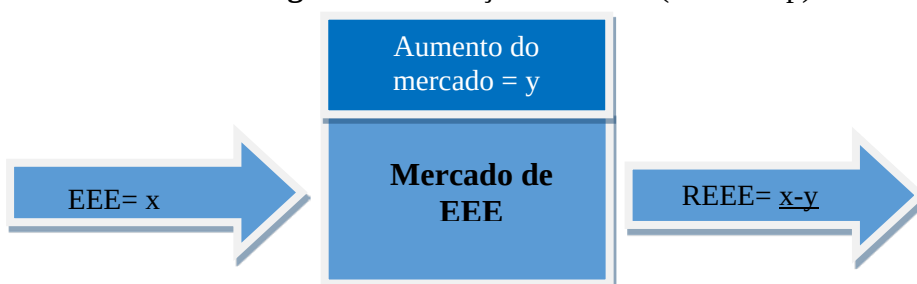


Fonte: ABNIEE (2012).

2. Time Step

Esse método tem princípios semelhantes ao do “Baseado em Vendas”, mas corrige o crescimento do mercado. Nele, as vendas são transformadas em resíduos subtraindo o crescimento do mercado (tanto em saturação quanto em quantidade de domicílios). A Figura 34 apresenta este método.

Figura 34 - Geração de REEE (Time Step)



Fonte: ABNIEE (2012).

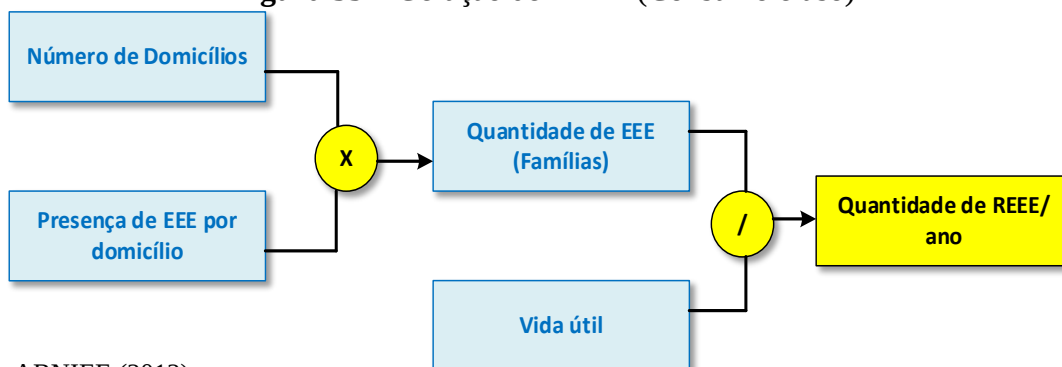
Para o crescimento do mercado são utilizados os dados de saturação e número de domicílios. Contudo, é preciso ter cuidado, pois se baseia na saturação do mercado, o que é difícil de ser estimado considerando que as residências podem ter mais de um equipamento.

3. Consumo e Uso

O método consegue calcular o volume de REEE sem os dados de vendas. Apesar dessa simplificação, se baseia nas duas variáveis de maior imprecisão: vida útil e nível de saturação do mercado.

O método calcula o volume de REEE sem considerar o volume de vendas, conforme mostra a Figura 35.

Figura 35 – Geração de REEE (Consumo e uso)



Fonte: ABNIEE (2012).

Os produtos manufaturados podem ser divididos em quatro categorias, como mostra a Figura 36.

Figura 36 – Linha de produtos foco do estudo

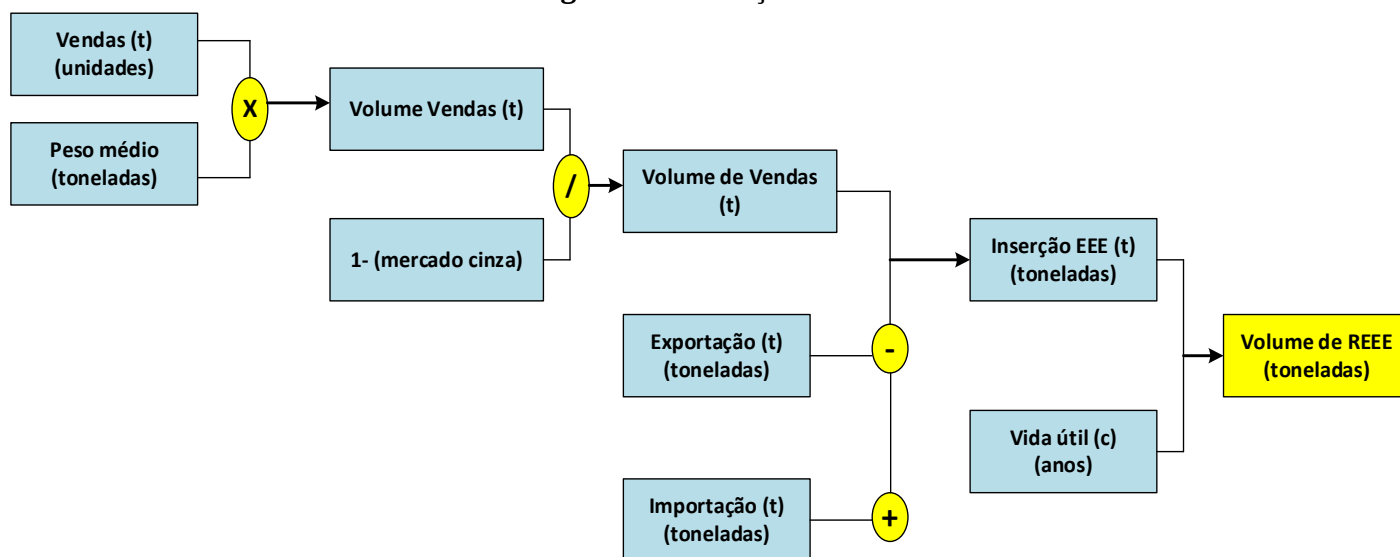


Fonte: Adaptado de Diagnóstico de Resíduos Eletroeletrônicos no Estado de MG (2009).

4. “Suprimento do mercado”

Nesse método é preciso obter os dados sobre: peso do equipamentos, volume de exportação e importação e vida útil dos equipamentos. Tenta simular acontecimento reais. Obtém valores confiáveis mesmo utilizando a vida útil do produto (impreciso e complexo), como mostra a Figura 37.

Figura 37 - Geração de REEE



Fonte: Adaptado de Diagnóstico de Resíduos Eletroeletrônicos no Estado de MG (2009).

5. Carnegie Mellon

Esse método tem princípios semelhantes ao do “Suprimento do mercado”, mas faz um cálculo mais detalhado da vida útil do produto. Nesse método, a vida útil do produto pode ser calculada considerando o tempo de reuso e o tempo que fica guardado antes do descarte. (FEAM, 2009).

7.6 ESTIMATIVA DO DEMAIS PARÂMETROS DA REDE

A população atendida e a divisão dos bairros também interferem na rede reversa de REEE, por isso para cada local em que a rede for aplicada há a necessidade de obter esses dados junto aos órgãos competentes, assim como o custo estimado do volume de transporte de REEE coletados.

8 APLICAÇÃO DA REDE REVERSA DE REEE PROPOSTA

8.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

8.1.1 Caracterização do município estudado

A cidade de Ilha Solteira localiza-se no extremo noroeste do estado de São Paulo, na divisa com Mato Grosso do Sul, na margem paulista do rio Paraná, logo abaixo da confluência com o rio São José dos Dourados, conforme Figura 38.

Possui uma população total de 26.443 (estimativa IBGE, 2016, crescimento de 1,39% em 4 anos) sendo homens: 48,67%; mulheres: 51,33%; urbana: 93,83%; e rural: 6,17%.

Entre os 42 municípios da região de Araçatuba, Ilha Solteira tem o 3º maior PIB, (R\$ 1,12 bilhão, sendo R\$44505,03 *per capita*) ficando atrás apenas de Araçatuba, com R\$ 2,72 bilhões e Birigui, com R\$ 1,25 bilhão em 2009 (IBGE, 2009).

Figura 38 – Localização do município a ser estudado no Estado de São Paulo



Fonte: IBGE, (2010)

8.2 SISTEMA DE GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS DOMICILIARES DO MUNICÍPIO DE ILHA SOLTEIRA

O município de Ilha Solteira produziu, em 2013, cerca de 19 toneladas de resíduos por dia (Prefeitura Municipal de Ilha Solteira, PREFEITURA MUNICIPAL DE ILHA SOLTEIRA- PMISA, 2013), ou seja, 0,73kg/hab/dia, próximo à média estimada pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SINIS, 2011) de 0,8 kg de resíduos por hab./dia.

Os resíduos são recolhidos pelo município em dias alternados em todo o perímetro urbano, exceto as quartas-feiras, que é realizada a coleta dos materiais recicláveis (coleta

seletiva). O município possui ainda um mapa para coleta desenvolvido pelo setor de manutenção e de limpeza pública.

O município conta com seis equipes de trabalho responsáveis pela coleta dos resíduos. Cada equipe é constituída por três funcionários públicos, sendo um motorista e dois garis, e a escala de serviço é feita através do sistema de empreita, ou seja, uma vez terminado o setor de determinado caminhão coletor, o mesmo retorna para o almoxarifado e os funcionários são dispensados.

A coleta seletiva no município de Ilha Solteira é realizada em parceria com a Cooperativa de Reciclagem e Seleção de Lixo- COOPERSELI, fundada ano de 2002, conta hoje com 11 cooperados, e uma renda financeira que varia entre R\$ 600,00 a R\$ 800,00 por mês para cada integrante.

Após recolhidos, os resíduos são enviados ao galpão da COOPERSELI para separação dos recicláveis. O galpão de separação tem aproximadamente 1200 m², porém é utilizado de maneira desorganizada. Os resíduos se acumulam como consequência da falta de associados na cooperativa, falta de incentivo por parte da prefeitura, falta de conscientização da população (junto aos recicláveis são enviados muitos resíduos orgânicos), grande quantidade de catadores autônomos que armazenam os resíduos em suas residências e a ausência de equipamentos. Segundo a PMISA (2013), são coletadas aproximadamente 12 toneladas de recicláveis por semana em Ilha Solteira, ou seja, 0,46kg/hab/dia.

O município de Ilha Solteira atualmente não desenvolve nenhuma ação específica para REEE, também não possui um controle preciso da quantidade destes resíduos.

8.3 LEVANTAMENTO DOS PARÂMETROS DA REDE

Como mostrado Ilha Solteira não apresenta nenhuma ação para coleta de REEE no município. Porém, o município realiza a coleta seletiva com o apoio de uma cooperativa a COOPERSELI, que aqui poderá ser adotada como um ponto de Trigem.

Assim, para a rede reversa proposta, algumas suposições serão necessárias como:

(1) A área de geração de lixo eletrônico foi considerada urbana, e foi estimada pelo método consumo e uso;

(2) O custo do transporte é linearmente proporcional à distância percorrida.

(3) A taxa de geração de REEE foi considerado constante no período de planejamento.

(4) Os Pontos de Entrega Voluntária (PEVs) foram pré- definidos num total de 7, com base na menor distância de transporte para os consumidores.

(5) A sede da Cooperativa de catadores de lixo, COOPERSELI, funcionou como estação de triagem;

(6) Foi considerada a necessidade da construção de uma estação de tratamento, distante da área urbana, preferencialmente.

8.3.1 Estimativa do volume de REEE de Ilha Solteira, SP

O volume médio estimado para Ilha Solteira baseou-se na metodologia consumo e uso, uma vez que a Prefeitura Municipal não possuía estes dados.

Para fins de simplificação da análise a rede proposta foi desenvolvida para REEE de pequeno e médio porte, linhas verde, marrom e azul, pois os de grande porte devem ser recolhidos nas residências.

O volume de REEE de pequeno porte foi calculado somando todos os outros REEE considerados no estudo (Televisor/Monitor, LCD/Plasma, DVD/VHS, Produtos de áudio, Desktop, Notebooks, Impressoras, Celulares, Batedeira, Liquidificador, Ferro elétrico, Furadeira).

O cálculo baseou-se no censo demográfico (IBGE, 2010) o qual traz que o município possui 8056 (oito mil e cinquenta e seis) domicílios, sendo que 7185 (sete mil cento e oitenta e cinco) possuem equipamentos da linha verde, azul e marrom.

Como o peso e o tempo de vida útil são diferentes, considerou-se que cada domicílio teria pelo menos 1 (um) equipamento da linha verde, 1 da linha marrom e 1 da azul. Assim, usando o método Consumo e Uso, obteve-se os resultados apresentados na tabela 9. Sendo que:

$$\text{Quantidade de EEE } (Q_{EEE \text{ família}}) = N^{\circ} \text{ domicílios} \times \text{EEE por domicílio} \quad (21)$$

$$Q_{EEE \text{ por ano}} = Q_{eee \text{ família}} / \text{Vida útil (média)} \quad (22)$$

Tabela 9– Resultado do Volume Médio Estimado para Ilha Solteira, SP

	LINHA VERDE Vida Útil $\cong$ 2 Anos; Peso Médio $\cong$ 15 Kg	LINHA MARROM Vida Útil $\cong$ 9 Anos; Peso Médio $\cong$ 17,5kg	LINHA AZUL Vida Útil $\cong$ 11 Anos; Peso Médio $\cong$ 17,5kg	TOTAL
Unidades por Ano	3592,00	798,00	654,00	3571,00
Kg/Ano	53880,00	13965,00	11445,00	79290,00

Fonte: elaborado pela autora

As gerações de REEE per capita média estimada foi de 2,99kg/habitante muito próximo a informação de 2,6 kg/habitante, proposta por Rodrigues²⁷ (2006, apud FEAM, 2009) para o Brasil.

1. Transporte até o PEVs ou Pontos de Recebimento (PR)

Para produtos de pequeno porte, o Consumidor transporta e entrega seu REEE na rede de pontos de entrega voluntária.

2. PEVs

A ABDI (2012), apresenta em seu estudo de viabilidade da Logística Reversa diferentes tipos de pontos de entrega voluntária como mostra a Tabela 10.

Tabela 10 - Diferentes pontos de recebimento

TIPOS	TONELADAS	TAMANHO (m²)	PESSOAL
0,5 tonelada	0,5	2	0,1
1,0 tonelada	1,0	3	0,3
2,0 toneladas	2	8	0,7
5,0 toneladas	5,0	16	1

Fonte: Elaborado pela autora

De acordo com o volume de resíduos gerados no município optou-se pelo PEV de 1,0 tonelada (3m²). Assim, foi calculado o custo aproximado de um ponto de recebimento, considerando o que se apresenta na Tabela 11.

Tabela 11 - Custos - Ponto de Entrega Voluntária

Equipamento	Quantidade	Valor Unitário mensal (R\$)	Valor anual total (R\$)
Pessoal	0,3	1000,00	3600
Espaço (m²)	3	35,00	1260
Material de escritório	1	50,00	600
Segurança (m²)	3	15,00	540
Valor total (R\$)			6000,00

Fonte: Elaborado pela autora

a) Proporção de PEVs por habitantes

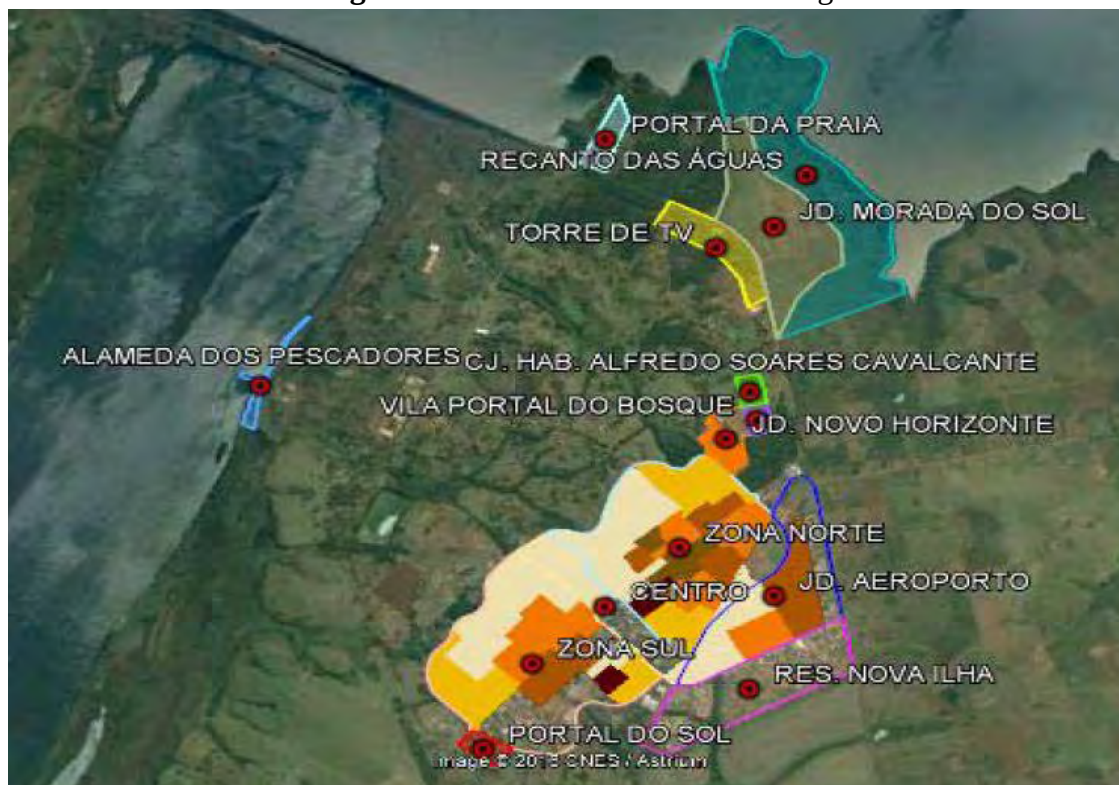
Após definido o tipo de PEV que será utilizado, foi necessário definir a quantidade. Para isso, determinou-se uma proporção entre número de habitantes e pontos de recebimento. Para auxiliar a tomada de decisão quanto ao número de PEVs, levantou-se a densidade demográfica por setor usando o QGIS, e dados do Plano Diretor do Município de Ilha Solteira, de 2007. A tabela 12 e as Figuras 39 e 40 apresentam esses dados:

²⁷ RODRIGUES, A. C. **Impactos socioambientais dos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos: estudo da cadeia pós-consumo no Brasil.** Dissertação (mestrado). Universidade Metodista de Piracicaba, Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. São Paulo. 2006. 162p.

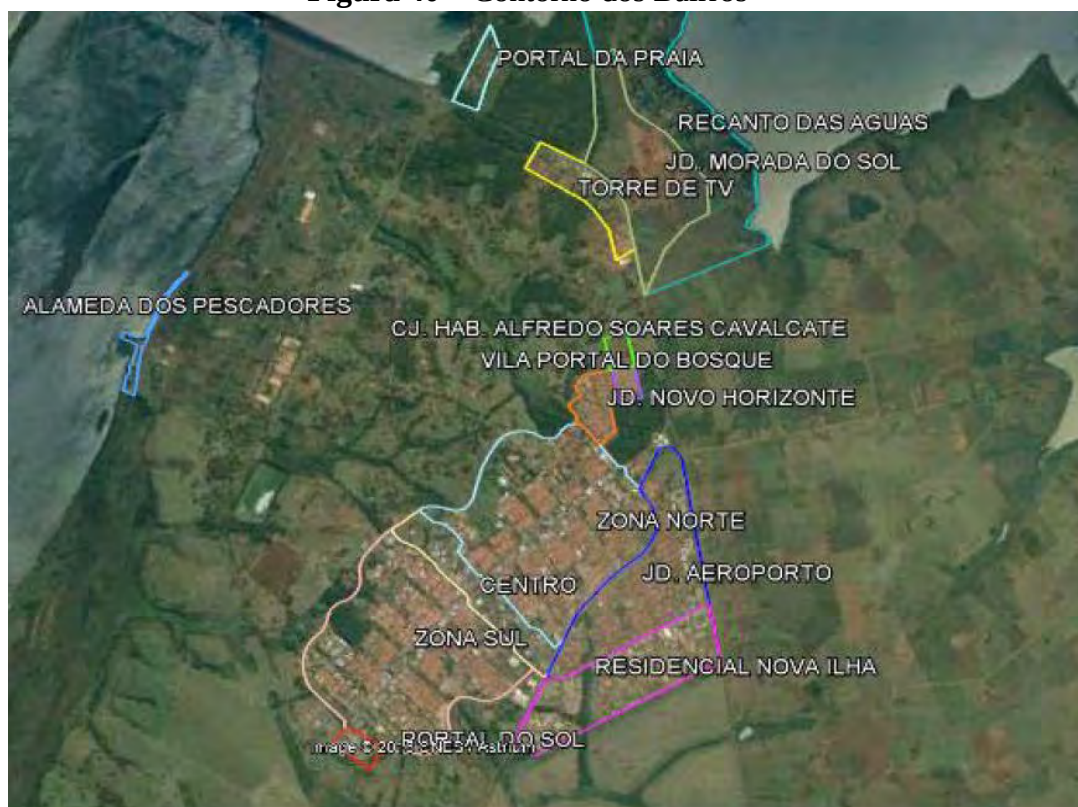
Tabela 12 – Densidade demográfica do município

BAIRRO	Área (m2)	SETORES (Hab/ Ha)							Área (ha)	TOTAL HAB
		0 a 7	8 a 25	25 a 40	41 a 68	69 a 88	89 a 120	121 a 168		
Portal do Sol	74849	7,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	53
Zona Sul	1971102	46,4	56,8	38,1	32,5	19,6	0,0	3,8	197,2	6435
Centro	420966	20,1	22,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	42,1	691
Zona Norte	1908369	14,4	54,3	42,4	34,9	22,5	16,1	6,2	190,8	9712
Jd. Aeroporto	956715	28,0	25,0	0,0	14,4	28,3	0,0	0,0	95,7	4290
Res. Nova Ilha	824299	82,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	82,4	577
Jd. Novo Horizonte	159378	6,8	0,0	0,0	9,1	0,0	0,0	0,0	15,9	667
Vila Portal Do Bosque	49177	4,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,9	34
Cj. Hab. Alfredo S. Cavalcante	52341	5,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,2	37
Alameda dos Pescadores	61010	6,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,1	43
Torre de TV	280028	28,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28,0	196
Jd. Morada do Sol	886418	88,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	88,6	620
Recanto das Aguas	1591344	159,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	159,1	1114
Portal da Praia	116832	11,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,7	82
Cinturão verde	7878477	16,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	787,8	117
Bairro Ipê	1402168	7,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	140,21	114
Total=									24811	

Fonte: Adaptado da Prefeitura Municipal de Ilha Solteira (2012).

Figura 39 – Bairros e densidade demográfica

Fonte: Elaborado pela autora

Figura 40 – Contorno dos Bairros

Fonte: Elaborado pela autora

O cálculo do número de PEV pode ser dado por:

$$N_{PEV} = \frac{Q_t}{C_c * f} \quad (23)$$

Sendo:

N_{PEV} : Número de Pontos de Entrega Voluntária;

Q_t : Quantidade total de REEE gerada semanalmente, em toneladas;

C_c : Capacidade de carga do PEV, em toneladas;

f : Frequência de coleta

Assim adotando-se 1 coleta a cada 15 dias; a capacidade dos PEVs de 1 tonelada e 1,34 toneladas coletada por semana, tem-se que:

$$N_{PEV} = 2,69 = 3 \text{ PEVs}$$

A Figura 41 e a Tabela 13 apresentam as possíveis localizações dos PEVS.

Figura 41 – Possíveis localizações dos PEVs



Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 13 – Possíveis localizações dos PEVs

	Pto 1 (PMISA) Ponto de Entrega Voluntária LIXO ELETRÔNICO	
	Pto 2 (Urubupunga) Ponto de Entrega Voluntária LIXO ELETRÔNICO	
	Pto 3 (Arno Hauser) Ponto de Entrega Voluntária LIXO ELETRÔNICO	

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 13 – Possíveis localizações dos PEVs (cont.)

	Pto 4 (EMEI-Jardim Aeroporto) Ponto de Entrega Voluntária LIXO ELETRÔNICO	
	Pto 5 (Centro Comunitário Novo Horizonte) Ponto de Entrega Voluntária LIXO ELETRÔNICO	
	Pto 6 (ETEC Ilha Solteira) Ponto de Entrega Voluntária LIXO ELETRÔNICO	
	Pto 7 (Cooperseli) Ponto de Entrega Voluntária LIXO ELETRÔNICO	

Fonte: Elaborado pela autora

Outra variável que influenciou no dimensionamento do número de PEV, é a distância máxima do mesmo até o usuário. Este é um fator extremamente relevante, pois para que o programa de coleta seletiva se desenvolva a população tem que estar comprometida a participar. Torre *et al*²⁸ (2003, apud PEIXOTO; CAMPOS; D'AGOSTO, 2005) relatam que em Glasgow, na Escócia, a distância média de caminhada até o PEV foi medida em 0,64 km para pedestres (39% dos casos) e de 1,53 km para usuários de veículos (59% dos casos), para que a coleta funcionasse. Já o estudo realizado por Chang e Wei²⁹ (1999, apud PEIXOTO; CAMPOS; D'AGOSTO, 2005) quanto menor a distância de caminhada, maior é a

²⁸ TORRE, P. L. G., DÍAZ, B. A., TORRES, A. R. (2003) Some comparative factors regarding recycling collection systems in regions of the USA and Europe. *Journal of Environmental Management* 69, p. 129-138, mai. Disponível: <http://www.sciencedirect.com> [capturado em 16 abr. 2005]

²⁹ CHANG, N., Wei, Y. L. Strategic Planning of Recycling Drop-Off Stations and Collection Network by Multiobjective Programming.(1999)*Environmental Management* 24 (2), p.247-263.

participação da população, e indicara um limite de 1,0km para que um cidadão típico vá até o PEV caminhando e de 1,5km de carro.

3. Centro de Triagem

Os centros de triagem são estruturas que recebem os REEE, realizam a separação, triagem e expedição para as recicladoras.

Cabe realçar que o modelo mais inteligente para a definição dos centros de triagem seria a partir de uma otimização da malha logística.

Segundo a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industria- ABDI (2012), existem 3 tipos básicos de Centro de Triagem (12.000, 3.600 e 1.200 toneladas anuais) que variam de acordo com o volume coletado. Para atender as necessidades do município optou pelo Centro de Triagem de 1200 toneladas anuais.

Optou-se por adaptar a sede da cooperativa existente no município, Cooperseli, (Figura 42), para que funcione como um Centro de Triagem (Figura 42). O custo da adaptação do local, de equipamentos e operacional do Centro seriam de R\$152700,00, (baseado no cálculo apresentado pela ABDI, 2012), atualizado pelo IGP-M, R\$ 200.868,75.

Figura 42 – Centro de Triagem (Cooperativa)

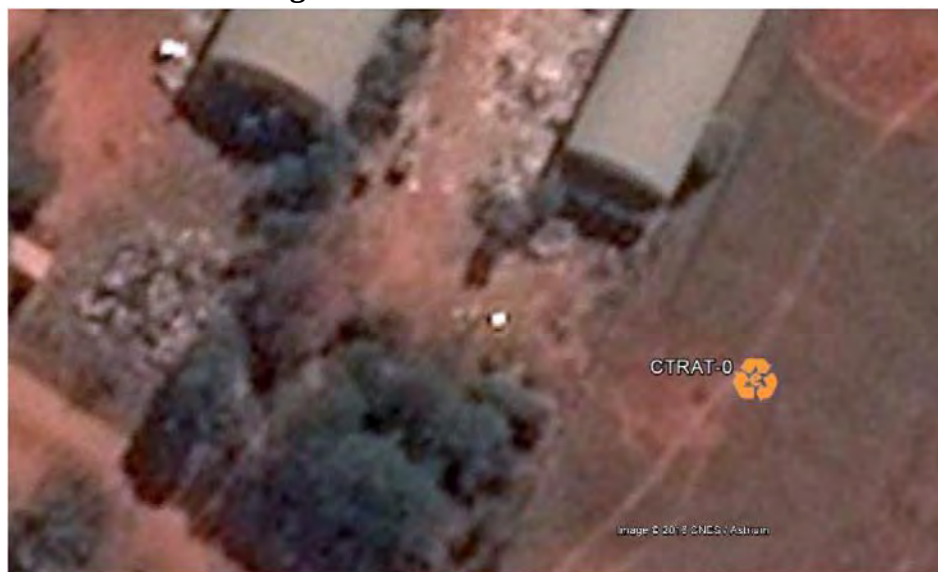


Fonte: Elaborado pela autora

4. Centro de Tratamento (Processamento)

Ainda de acordo com a ABDI (2012), o custo médio da tonelada processada de REEE de pequeno porte é de R\$ 402,46 em 2012, para valores atuais (pelo IGP-M) R\$520,47. Assim, o custo total anual de Processamento seria de R\$ 35.920,02. E o custo fixo da abertura do centro seria de R\$252.756,62. As Figuras 43,44 e 45 trazem as possíveis localizações dos centros de tratamento.

Figura 43 – Centro de tratamento – 0



CTRAT-0
Centro de Tratamento LIXO ELETRÔNICO

Fonte: Elaborado pela autora

Figura 44 – Centro de tratamento – 1



CTRAT-1
Centro de Tratamento LIXO ELETRÔNICO

Fonte: Elaborado pela autora

Figura 45– Centro de tratamento – 2

Fonte: Elaborado pela autora

5. Custo unitário por km por quantidade

A Prefeitura Municipal de Ilha Solteira não forneceu os dados sobre o custo de transporte por tonelada coletada da coleta seletiva. Mas, a literatura estudada fornece alguns valores como: Brasília apresentava um custo por km coletado em 2009 de R\$15,36, de acordo com Tribunal de Contas do Distrito Federal (TCDF, 2009), atualizando para o ano de 2017, este valor seria de R\$ 25,30 (<http://calculoexato.com.br>).

Em Santa Catarina, um consórcio de coleta seletiva de municípios de pequeno porte (CIRSURES, 2014) apresentou um custo de R\$15,63 em 2014, para o ano de 2017 este custo seria de R\$18,30 (<http://calculoexato.com.br>).

Um estudo feito pela Fundação Nacional de Saúde- FUNASA (2010) sobre programas de coleta seletiva na região metropolitana de São Paulo apresentou o custo de R\$ 40,00, já atualizado para 2016.

Em um levantamento nas cidades vizinhas, com aproximadamente o mesmo número de habitantes e dias de coleta, o resultado obtido foi de R\$15,53 por km por quantidade, o qual será adotado para o estudo.

6. Levantamento das distâncias, áreas relacionadas

Para se obter a localização dos PEVs e da estação de tratamento, considerando-se as menores distâncias entre os PEVs e a estação de triagem/transbodo, e entre ela e a de tratamento, foi usado o aplicativo Google Maps PRO e exportado para o *software* Quantum GIS (QGIS) 2.12 Lyon.

Para alcançar o objetivo proposto, de representação espacial da rede, foram efetuadas as seguintes etapas.

Fase 1 - Criação de um banco de dados georreferenciado utilizando uma base de dados digitais de projetos e instituições públicas como: Laboratórios de Topografia e Geoprocessamento (UNESP - FEIS), Prefeitura Municipal de Ilha Solteira (PMISA), Instituto Geográfico e Geológico de São Paulo (IGGSP) e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Os dados obtidos por estarem em diferentes formatos e sistema de referência foram colocados em uma mesma base cartográfica no sistema oficial de referência do Brasil SIRGAS2000.

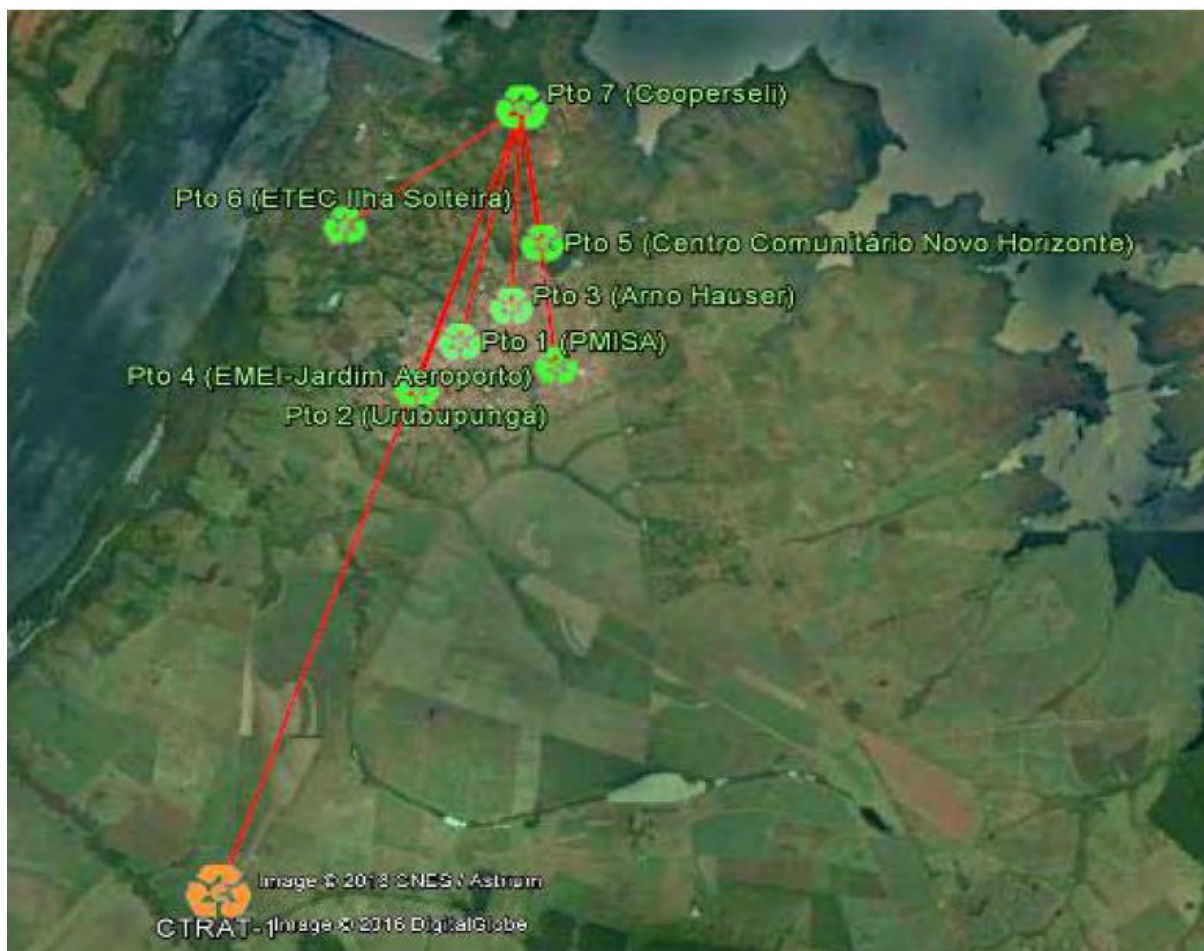
A área de estudo foi delimitada e recortada em torno da área urbana do município de Ilha Solteira, acompanhando as principais bacias de contribuição do município. Depois de definido o limite serão recortados todos os planos de informações para que fiquem na mesma dimensão.

Nas Figuras 43 e 44 apresentam-se as localizações, dos PEVS e suas distâncias euclidianas até o Centro de Triagem. Na Tabela 14 são apresentadas as distâncias e na Tabela 15 apresentam-se as áreas e o perímetro dos bairros.

Tabela 14 – Distâncias euclidianas e viárias dos PEVs ao Centro de Triagem

PONTO	Coordenadas (UTM/22S)(m)		Distâncias (m) ao Centro de Triagem (Pto 7)			
			Euclidiana	Rota		
	X (E)	Y (S)		Ida	Volta	Média
1	464068	7741255	3556	5072	4708	4890
2	463495	7740565	4377	8504	9484	8994
3	464752	7741781	2939	4332	3792	4062
4	465354	7740912	3834	4866	4846	4856
5	465167	7742708	2029	3964	3701	3833
6	462529	7743000	2912	4143	4358	4251
C. Triagem (7)	464881	7744717	0	0	0	0
CT-0	464892	7744668	50	50	50	50
CT-1	460860	7733109	12285	13640	13572	13606
CT-2	462736	7742989	2754	3835	4544	4190

Fonte: Elaborado pela autora

Figura 46 – Distâncias Euclidianas dos PEVs ao Centro de Triagem

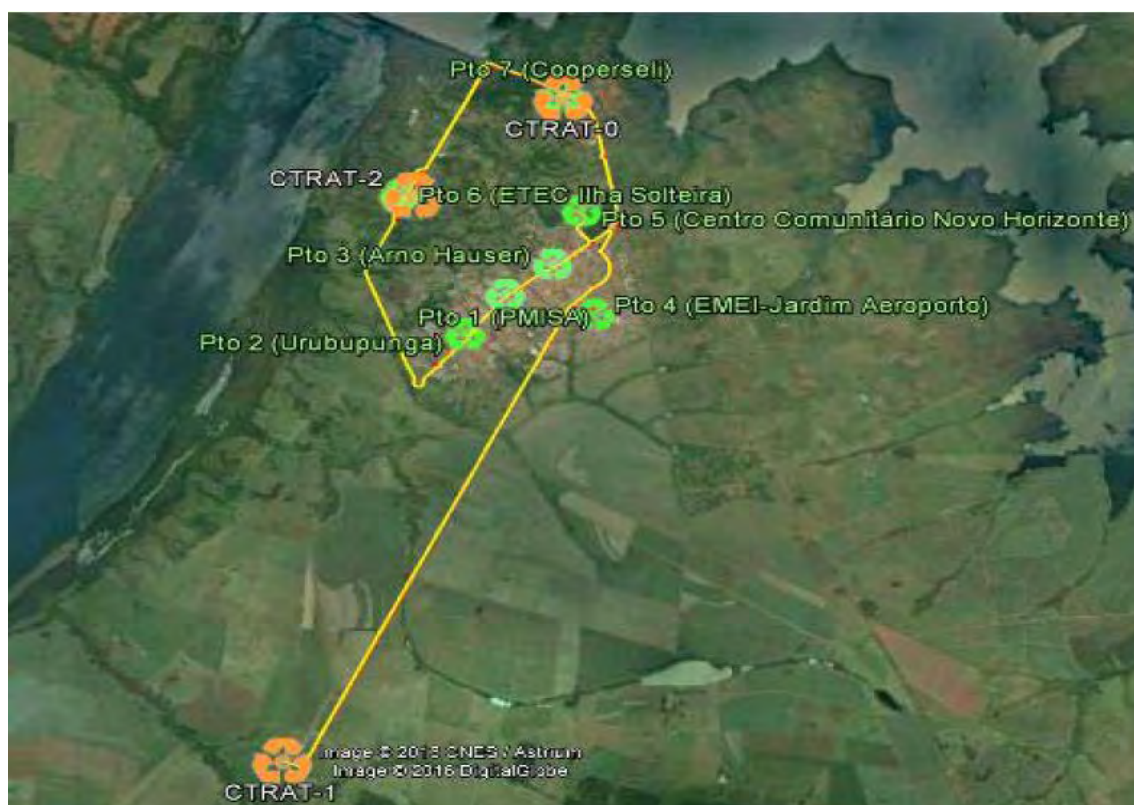
Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 15 - Perímetro e áreas dos bairros

BAIRRO	Perímetro (m)	Área (m ²)
PORTAL DO SOL	1158	74849
ZONA SUL	5837	1971102
CENTRO	4269	420966
ZONA NORTE	5916	1908369
JD. AEROPORTO	5232	956715
RES. NOVA ILHA	4494	824299
JD. NOVO HORIZONTE	1798	159378
VILA PORTAL DO BOSQUE	904	49177
CJ. HAB. ALFREDO SOARES CAVALCANTE	943	52341
ALAMEDA DOS PESCADORES	2765	61010
TORRE DE TV	2825	280028
JD. MORADA DO SOL	4935	886418
RECANTO DAS AGUAS	8972	1591344
PORTAL DA PRAIA	1703	116832

Fonte: Elaborado pela autora

Figura 47 – Distâncias Viárias dos PEVs ao Centro de Triagem



Fonte: Elaborado pela autora

Com base nesses dados, foi possível dar prosseguimento com o procedimento de identificação das melhores localizações para os PEVs, e o Centro de Tratamento. Os procedimentos para essas escolhas estão descritos no capítulo 8.

9 RESULTADOS

9.1 PROCEDIMENTO

O processamento e análise dos dados georreferenciados foi realizado usando os seguintes *software*:

3. Sistema Operacional: Windows 10 – 64 bits ;
4. Programa SIG: QGIS – 64 Bits – Versão 2.14 Essen
 - o Módulos complementares: Easy AHP – Versão 1.0
 - o GRASS 7 – Versão 2.0
 - o SAGA – Versão 2.3.2.

9.1.1 - 1ª Etapa: Montagem da base de dados georreferenciada no QGIS

Para montagem da base de dados foram utilizados:

Arquivos vetoriais georreferenciados em formato *Shapefile* do município de Ilha Solteira, com coordenadas geográficas no sistema de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), referentes à zona cartográfica 22, hemisfério Sul e Datum SIRGAS 200030 com as seguintes camadas de dados:

1. Limite municipal;
2. Perímetro urbano;
3. Setores (bairros),
4. Malha viária.

Obs. Material cedido pelo Laboratório de Topografia da FE Ilha Solteira (PEC. A - E. 1:1000).

Arquivos matriciais (raster) georreferenciados, em formato *geotiff* do mapa base de fundo do *Open Street Map* (OSM) e Imagens orbitais do servidor Web do Google Maps.

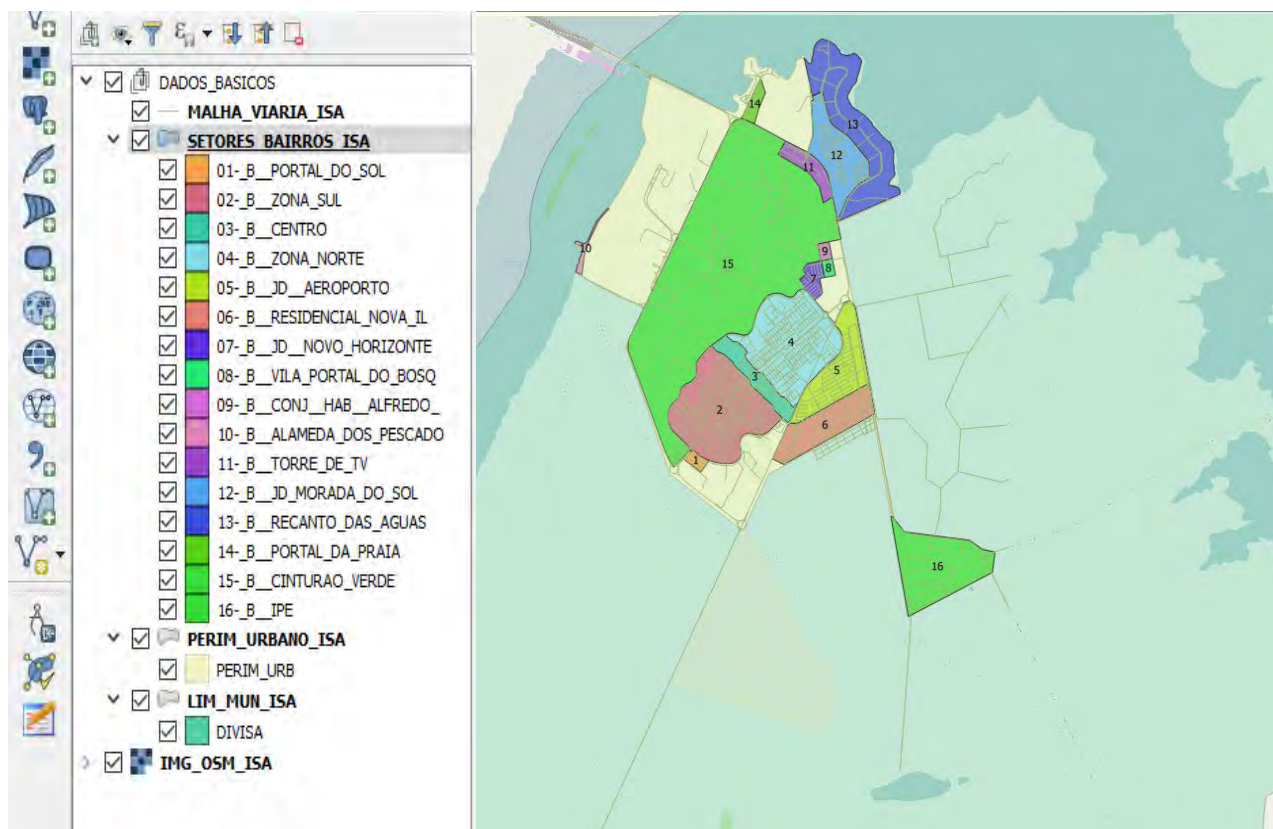
9.1.1.1 Criação do Projeto “C_REEE” e inserção dos dados básicos (Figura 48)

1. No programa QGIS, define-se o Sistema de Referência de Coordenada (SRC) do projeto para SIRGAS 2000 / UTM zone 22S – EPSG: 31982.
2. Criação do grupo de camadas “DADOS_BASICOS” e inserção das camadas com os dados básicos. Arrastar para a área gráfica do programa os arquivos dos dados básicos.
3. Salvar o projeto.

A Figura 48 apresenta a criação do projeto

³⁰ Sistema de referência cartográfica oficial do Brasil - IBGE

Figura 48 - Criação do Projeto C_REEE e inserção dos dados básicos



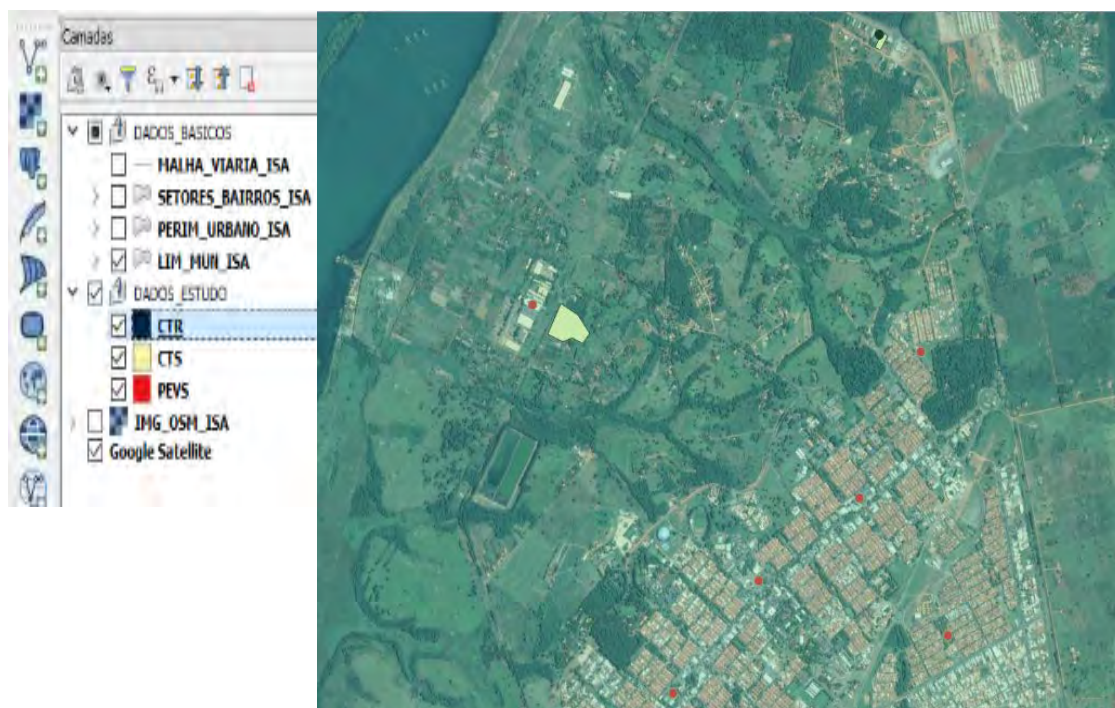
Fonte: Elaborado pela autora

9.1.1.2 Criação dos elementos de estudo em formato vetorial

1. Ativa-se uma camada com as imagens orbitais “IMG_OSM” e/ou “Google Satellite” e localizam-se os pontos de interesse: Centro de Triagem (CTR), Centros de Tratamentos (CTS) e Pontos de Entrega Voluntária (PEV).
2. Cria-se uma nova camada vetorial (*shapefile*) tipo polígono para cadastrar as áreas dos elementos e os campos dos seus atributos (NOME, AREA, SETOR) e depois salvar;
 1. Vetorizar cada feição usando as ferramentas digitalizar, adicionar feição e salvar.

A Figura 49 apresenta o resultado obtido.

Figura 49 - Criação dos elementos de estudo em formato vetorial

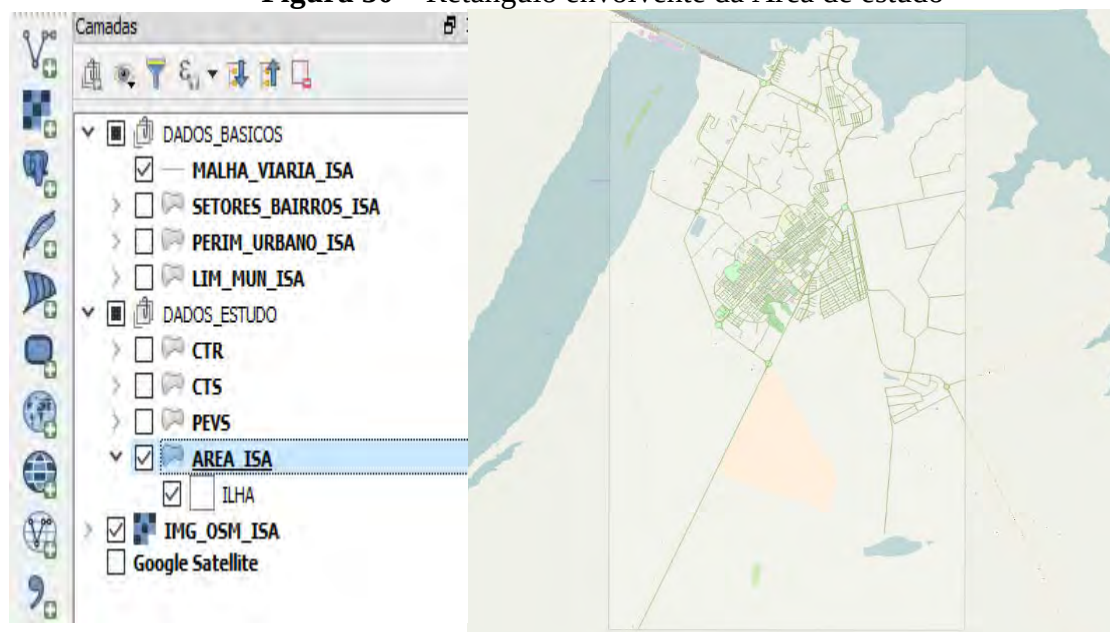


Fonte: Elaborado pela autora

9.1.1.3 Delimitação da área de estudo

Para delimitação da área de estudo criou-se um retângulo abrangendo toda a região de análise. Para isso, da mesma forma, criou-se a camada vetorial limite denominada “AREA_ISA” cujos valores são: E(Min) 460385.60, N(Min) 7732766.90 e E(Max) 469689.49, N(Max) 7746925.84. Como apresentado na Figura 50.

Figura 50 – Retângulo envolvente da Área de estudo



Fonte: Elaborado pela autora

9.1.1.4 Conversão dos dados vetoriais em matriciais (raster)

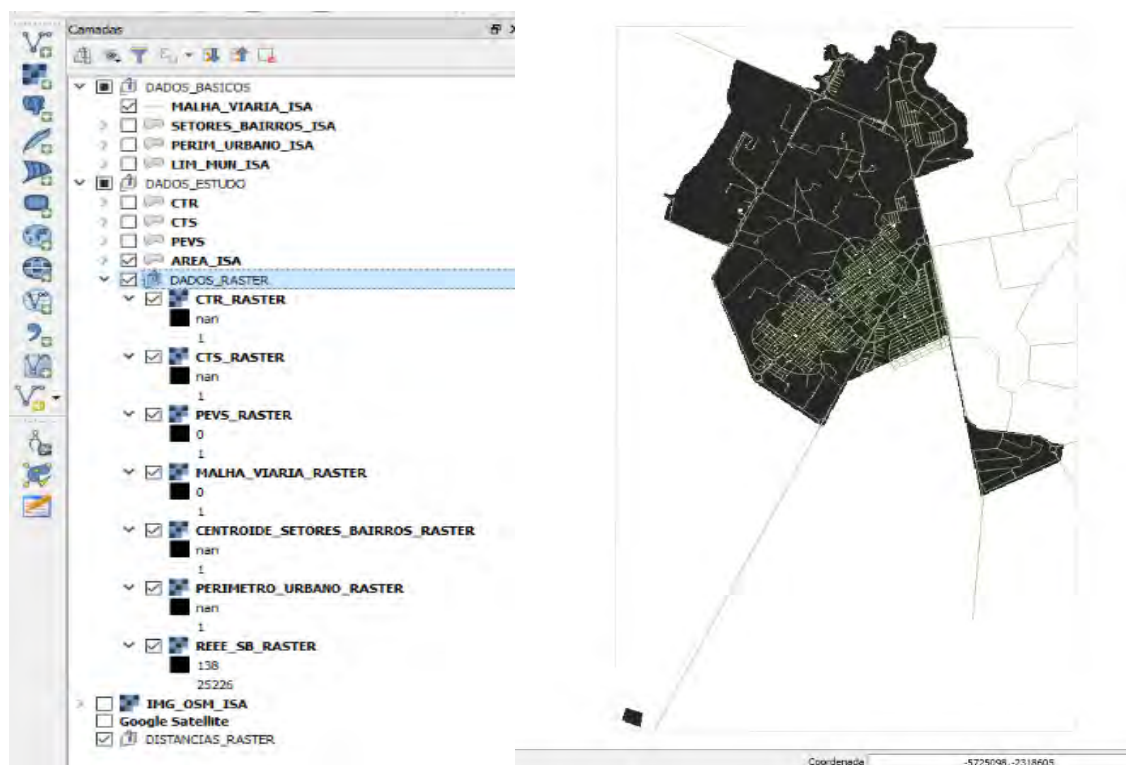
Para elaboração dos mapas de distância, foi necessário, primeiro, converter os dados vetoriais em dados *raster*, para que apresentasse em cada *pixel* um valor real da distância à feição mais próxima, sendo esta do tipo linha ou polígono (Perímetro urbano, Setores, Malha viária e combinações).

Foi utilizado o algoritmo do módulo GRASS “v.to.rast.value” para converter camada vetorial em camada *raster*, com valor “1” para presença de feição (linha ou polígono) na célula e “nan”³¹ para o contrário.

Foram convertidas as camadas malha viária (MALHA_VIARIA_ISA), perímetro urbano (PERIM_URBANO_ISA), centro de triagem (CTR), centros de tratamento (CTS) e pontos de entrega voluntária (PEVS) em camadas *_RASTER* e, posteriormente, a camada derivada dos atributos geográficos, (CENTROIDE_SETORES_BAIRROS) que representa o centroide dos setores (bairros).

Também foi convertida em camada *raster*, com valores referentes aos atributos, a camada (REEE_SB) que representa a quantidade de Resíduo de Equipamento Eletroeletrônico produzido no setor, como apresentado na Figura 51.

Figura 51 – Conversão dos dados vetoriais em matriciais (raster)



Fonte: Elaborado pela autora

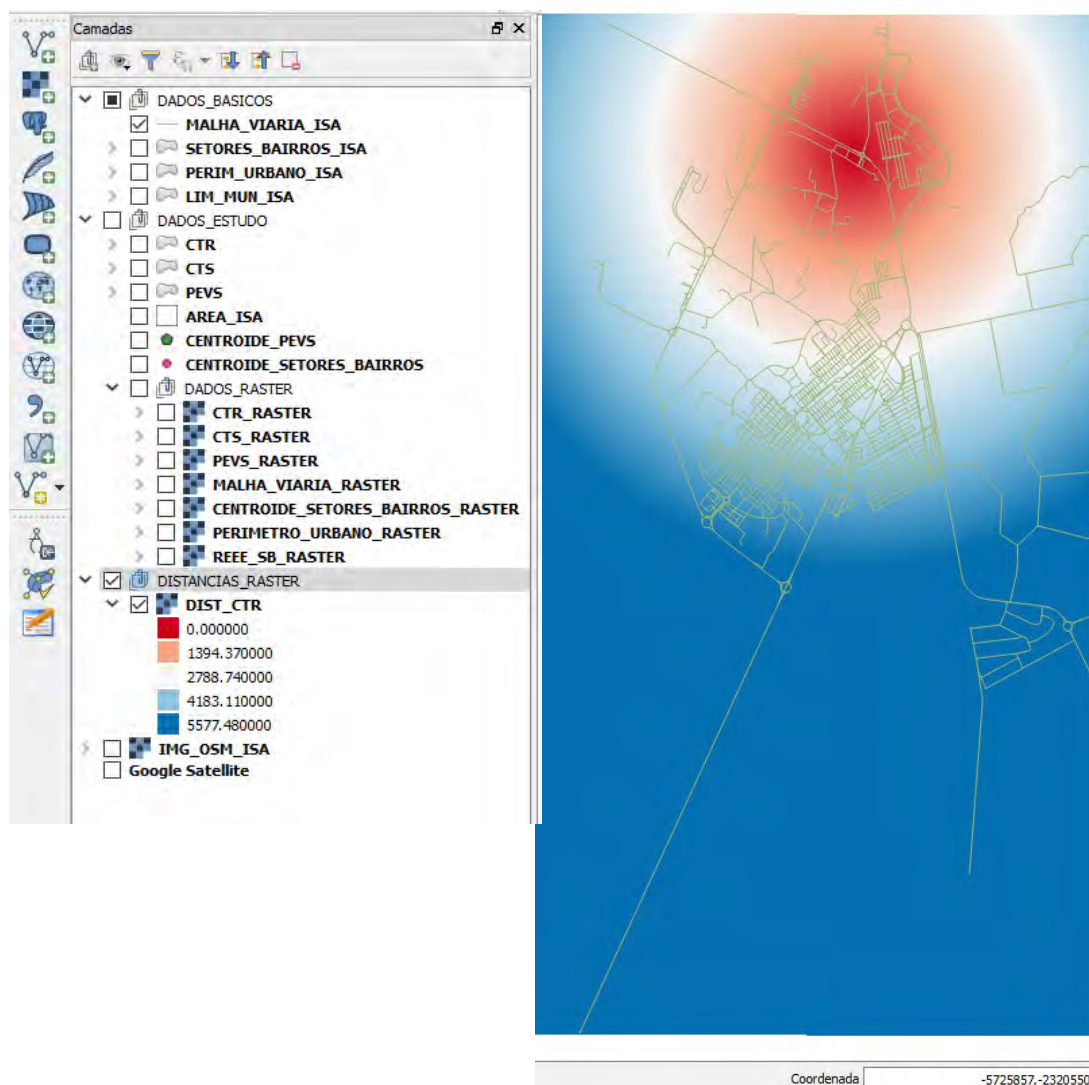
9.1.2 2ª Etapa - Elaboração dos mapas de distância

³¹ not a number (nan) é uma representação numérica no padrão IEEE 754.

Os mapas de distância foram elaborados com o uso do algoritmo do módulo GRASS “r.grow.distance” a partir dos dados *raster* gerados no item 8.1.1.3, onde a distância é obtida em cada *pixel* como a distância ao *pixel* mais próximo e cujo valor é 1 no dado *raster* de entrada.

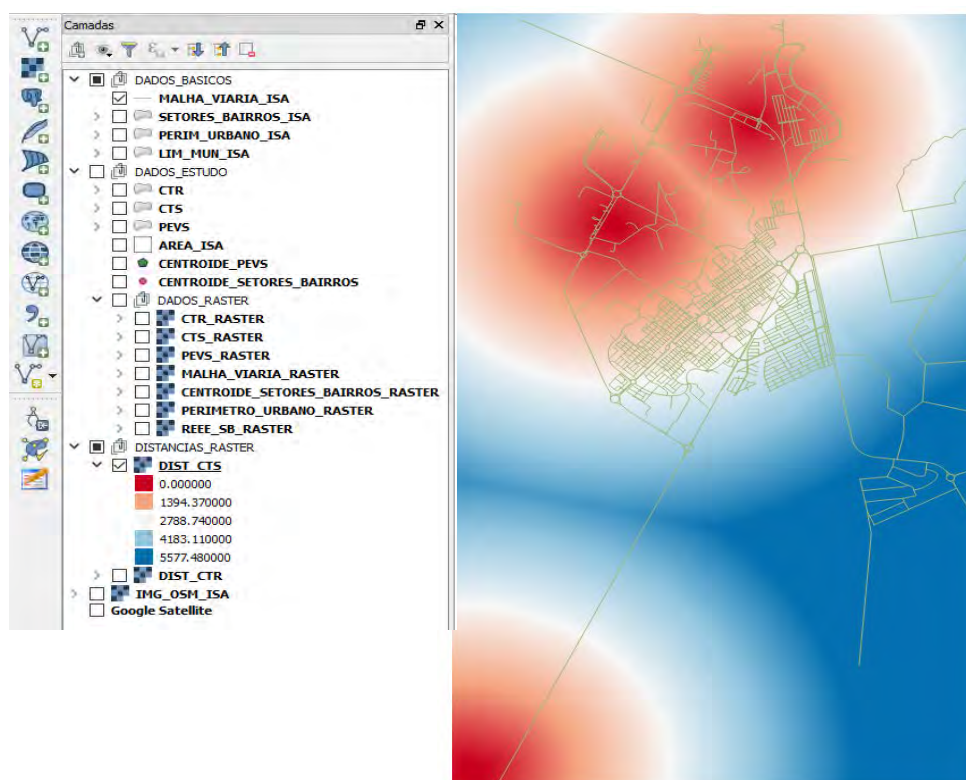
Foram elaborados os mapas de distância do centro de triagem (CTR), dos centros de tratamento (CTS), dos pontos de entrega voluntária (PEVs), da malha viária (MALHA_VIARIA), do centroide dos setores-bairros (CENTROIDE_SETORES_BAIRROS), do perímetro urbano (PERIMETRO_URBANO). Nas figuras 52, 53, 54, 55, 56 e 57 são mostrados os resultados encontrados.

Figura 52 - Distância do centro de triagem “DIST_CTR”



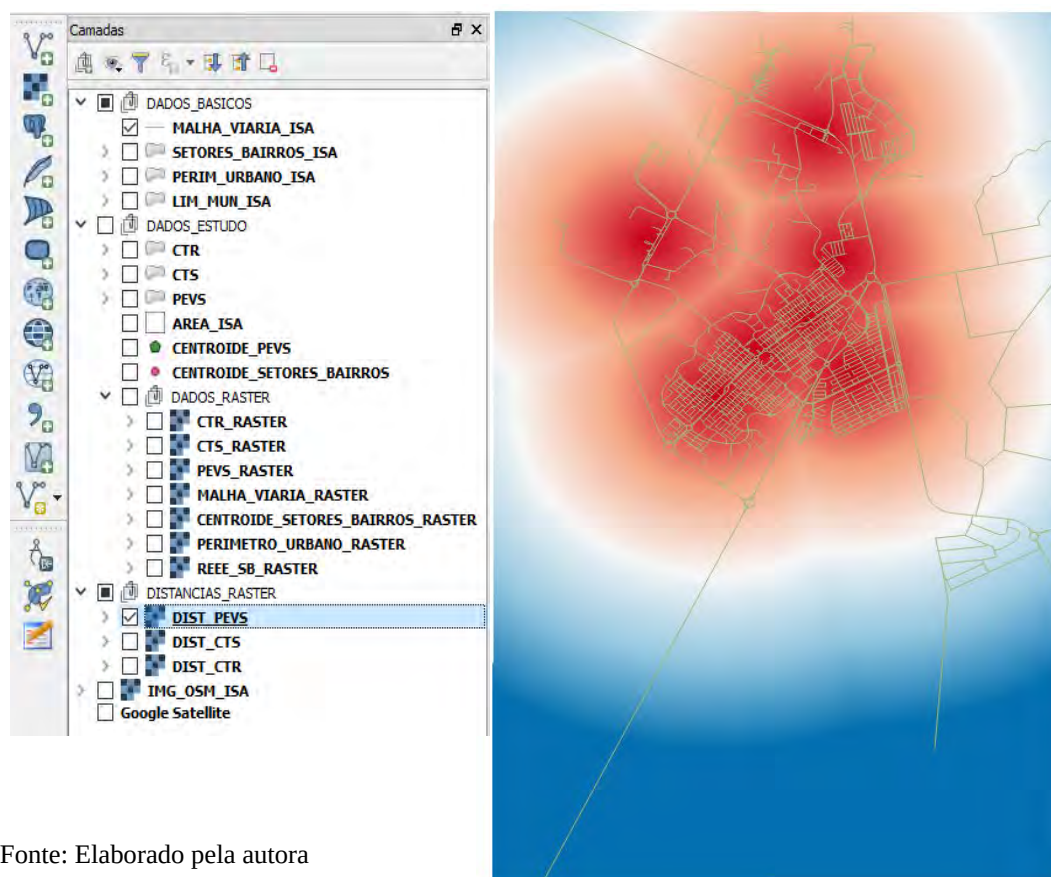
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 53 - Distância dos centros de tratamento “DIST_CTS”



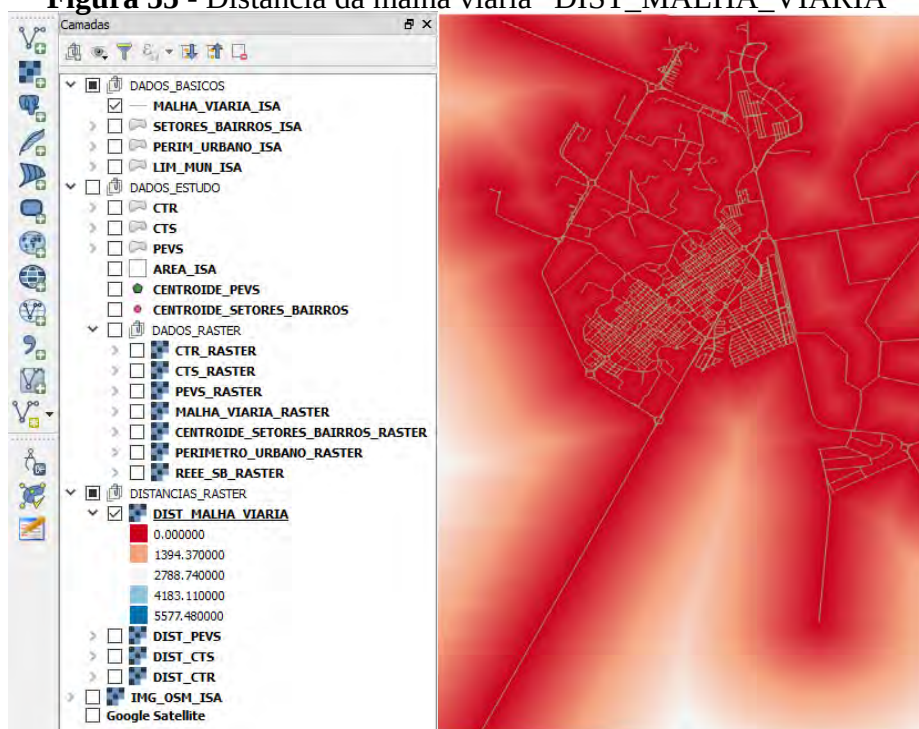
Fonte: Elaborado elo autor

Figura 54 - Distância dos pontos de entrega voluntária “DIST_PEVS”



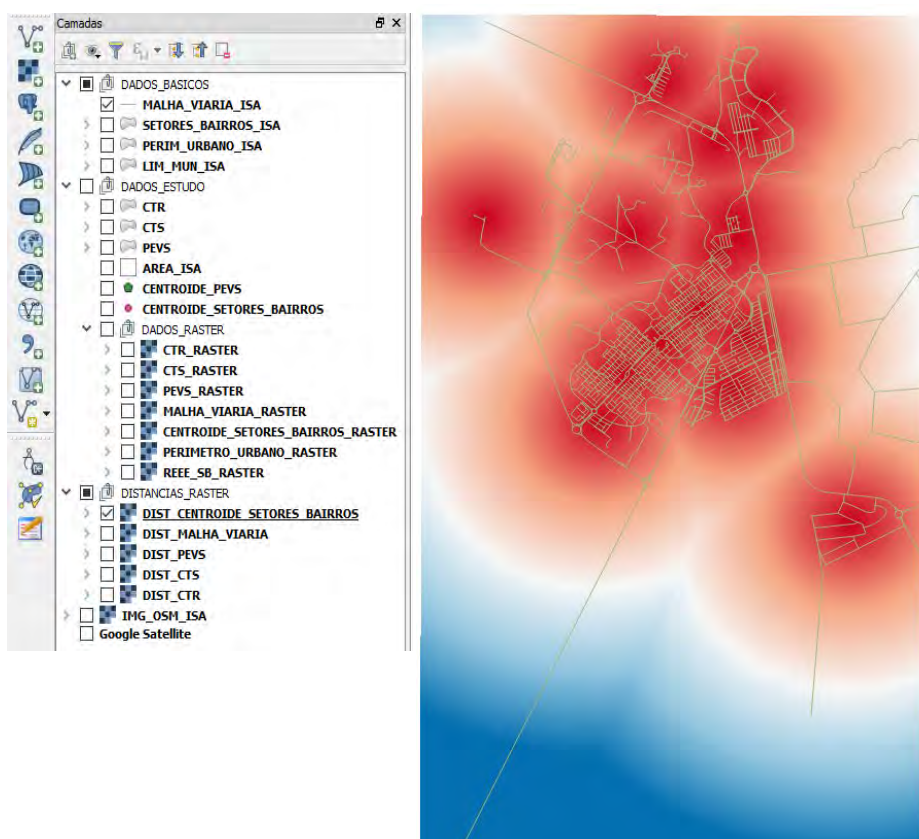
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 55 - Distância da malha viária “DIST_MALHA_VIARIA”



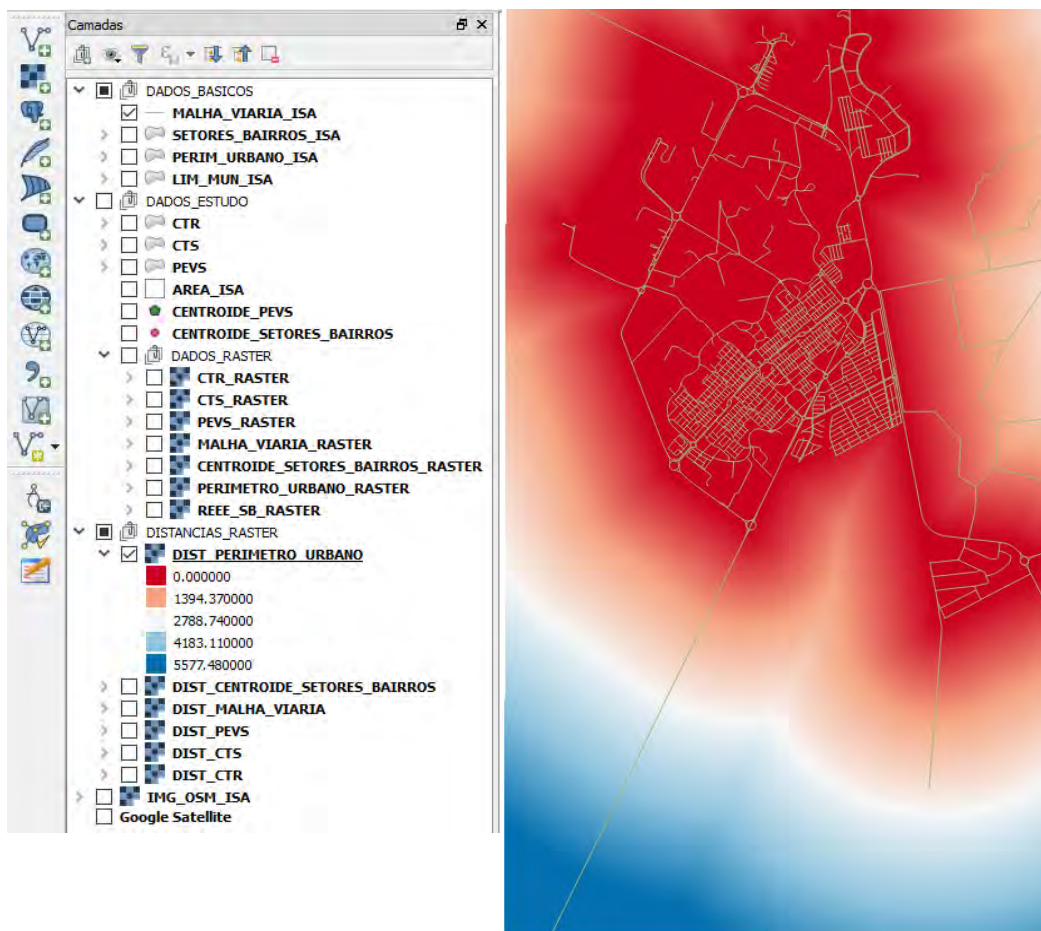
Fonte: Elaborado pela autora

**Figura 56 - Distância do centroide dos setores (bairros)
“DIST_CENTROIDE_SETORES_BAIRROS”**



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 57 - Distância do perímetro urbano “DIST_PERIMETRO_URBANO”



Fonte: Elaborado pela autora

9.1.3 Elaboração dos mapas Fuzzy

Para normalização dos mapas foi aplicada a técnica de fuzzificação por meio do algoritmo “*Fuzzify*” do modulo SAGA, que implementa a lógica *fuzzy* ao conjunto de mapas de entrada (Figura 58).

A função triangular utilizada para a normalização dos critérios é apresentada na Figura 59.

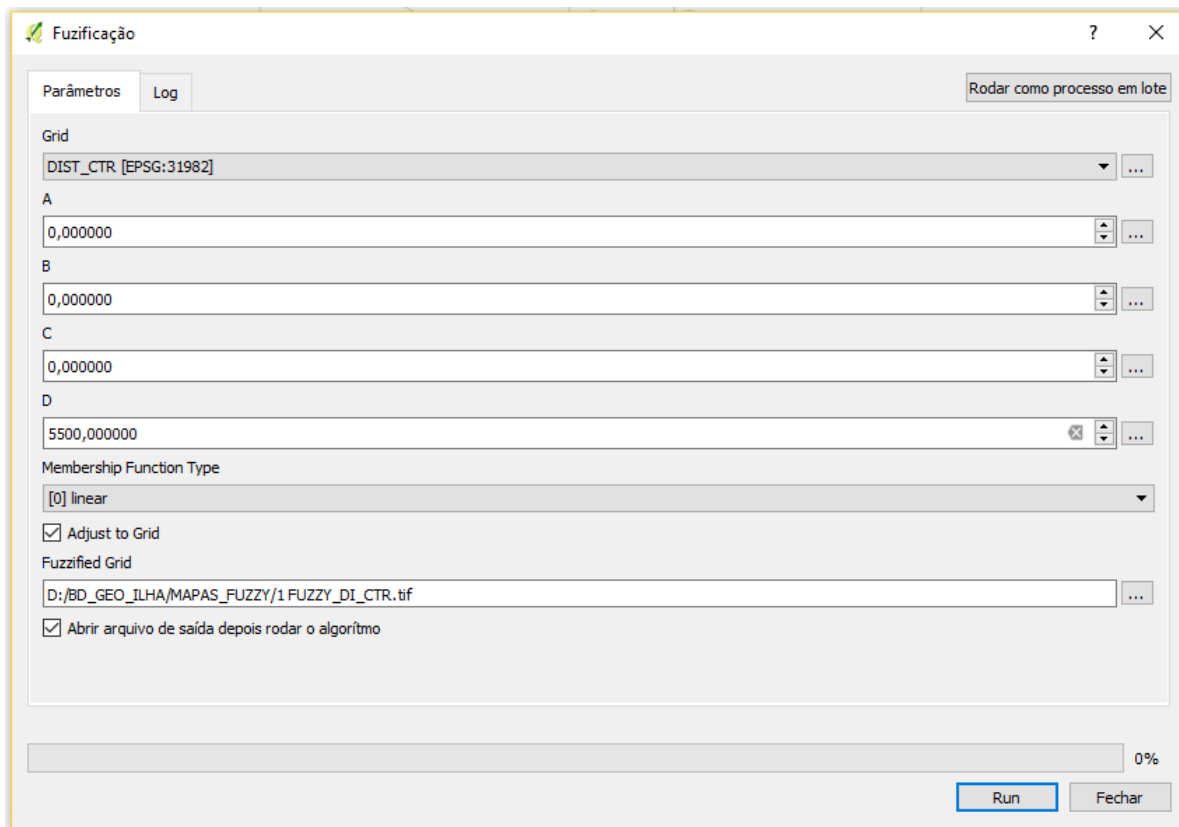
Este processo permite que valores de critérios não comparáveis entre si sejam normalizados para uma mesma escala, viabilizando a agregação entre eles. Na maior parte dos processos de normalização utiliza-se os valores máximo e mínimo para a definição de uma escala. A forma mais simples é uma variação linear (EASTMAN, 1997, apud ZAMBOM et al., 2005).

Segundo Zambon (2005):

O processo de normalização é na sua essência idêntico ao processo de fuzzificação introduzido pela lógica *fuzzy*, segundo o qual um conjunto de valores pode ser expresso (convertido) numa escala normalizada (por

exemplo, entre zero e um), tornando-os comparáveis. (ZAMBON et al., 2005, p. 190-191).

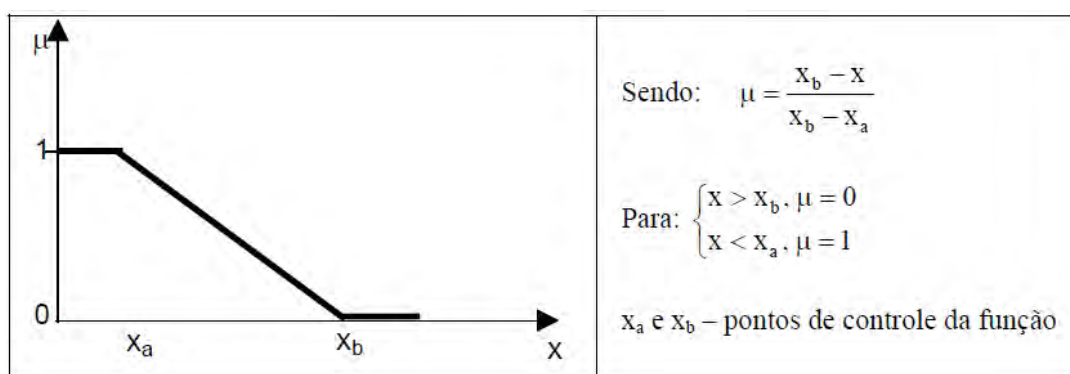
Figura 58 - Fuzzificação



Fonte: Elaborado pela autora

A função triangular *fuzzy* utilizada para a normalização do critério usada foi a mostrada da figura 59.

Figura 59 – Função Fuzzy

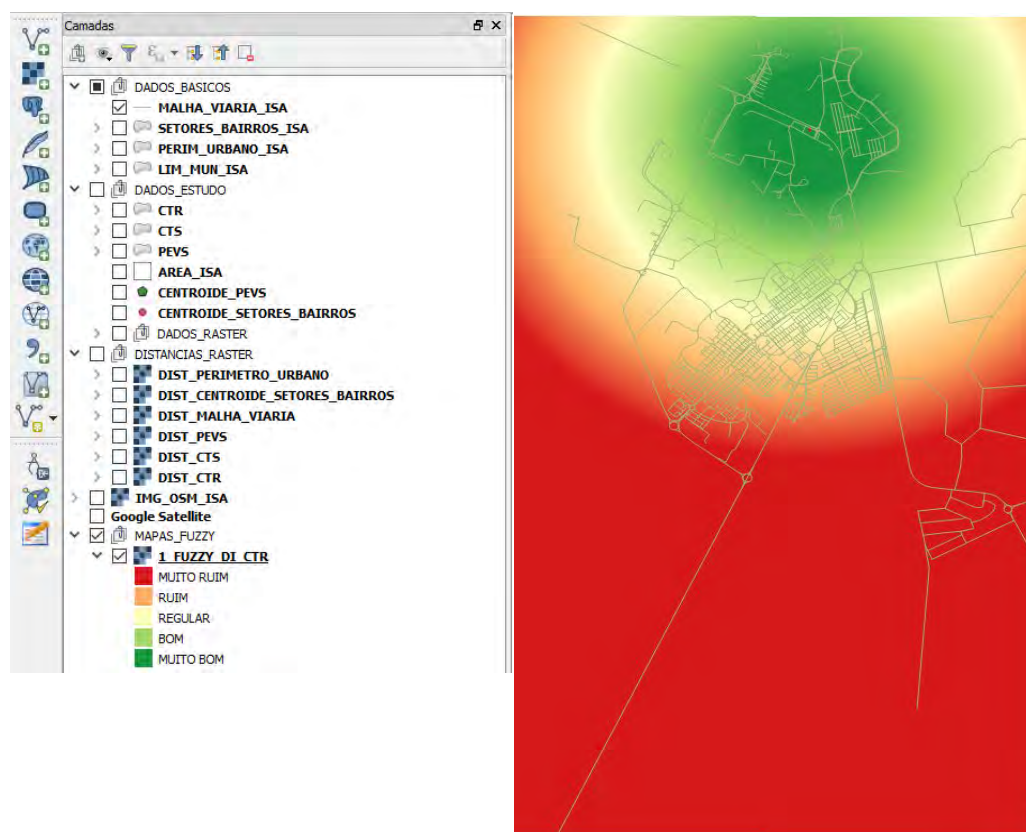


Fonte: Zambon et al., (2005)

Foram fuzzificados os seguintes mapas:

1. **Mapa de distância do centro de triagem:** denominado de “FUZZY_DI_CTR” considerando o ordenamento inverso de quanto menor for a distância, melhor será o resultado. Foi considerado como limite máximo a distância de 5,5 km. Sendo os pontos de controle foram assim definidos: $x_a = 0$ e $x_b = 5,5$ km. O resultado é apresentado na Figura 60.

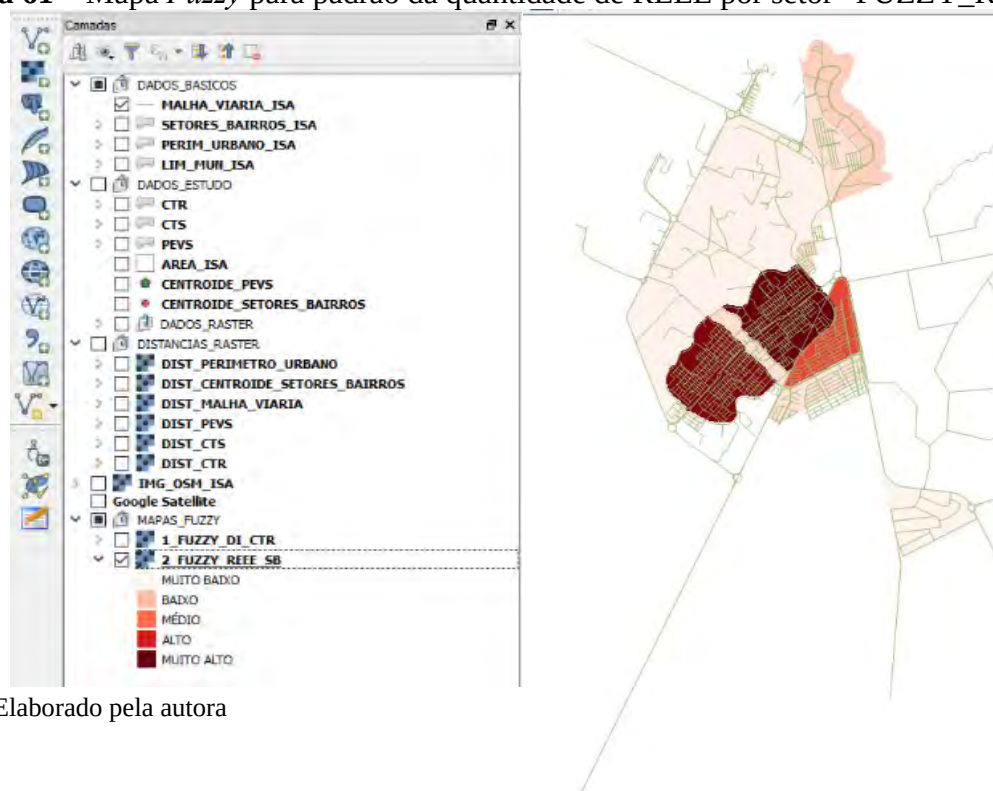
Figura 60 – Mapa *Fuzzy* para padrão de distância ao centro de triagem “FUZZY_DI_CTR”



Fonte: Elaborado pela autora

2. **Mapa da quantidade de resíduo de equipamento eletroeletrônico produzida por setor (bairro):** denominado de “FUZZY_REEE_SB”. O resultado está na Figura 61.

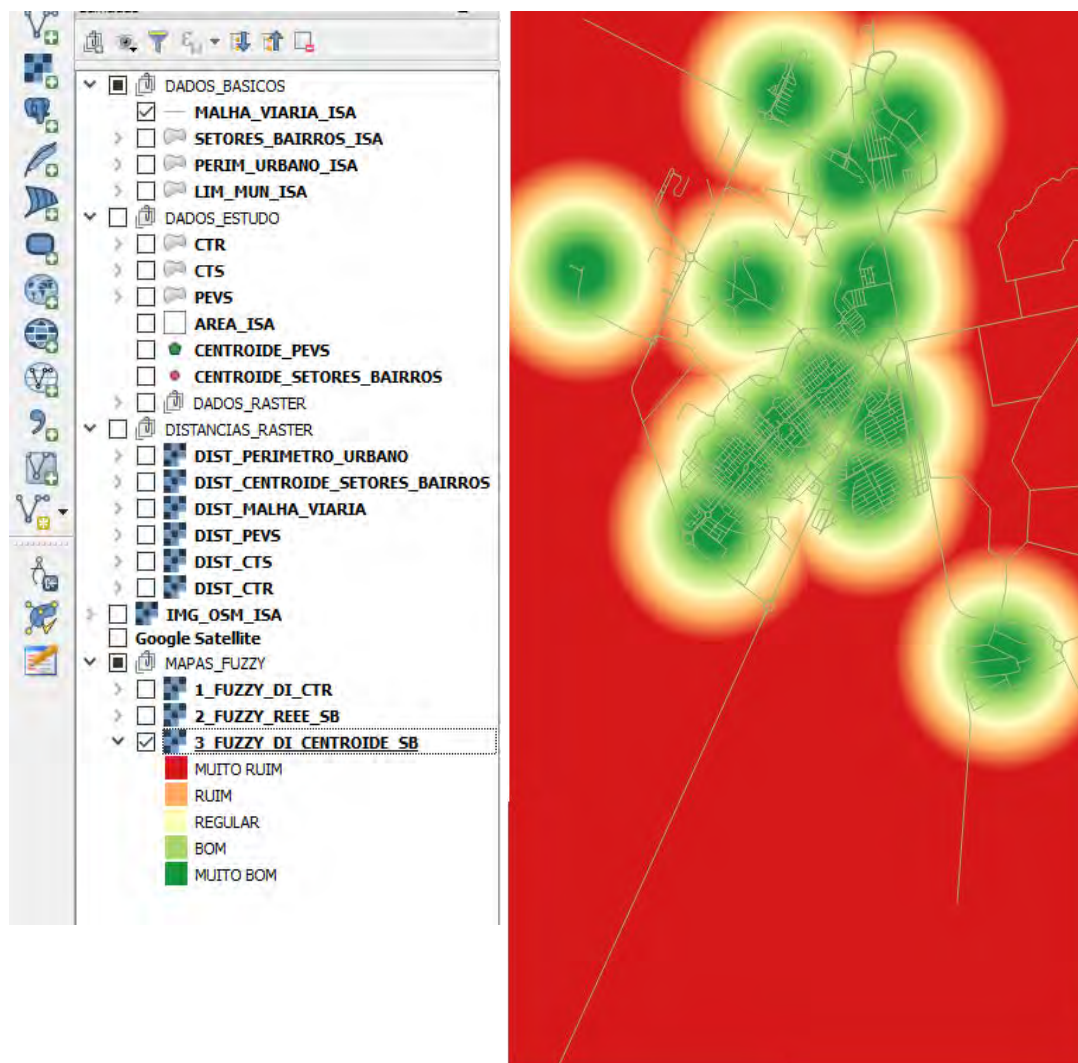
Figura 61 – Mapa *Fuzzy* para padrão da quantidade de REEE por setor “FUZZY_REEE_SB”



Fonte: Elaborado pela autora

3. **Mapa da distância para descarte a partir do centroide dos bairros**, denominada de “FUZZY_DI_CENTROIDE_SB”. A distância deve ser menor que 1,5 km para atender o usuário de forma satisfatória. Ordenamento inverso de quanto menor for a distância, melhor será o resultado. Assim: $x_a = 0$ e $x_b = 1500\text{m}$. O resultado é apresentado na Figura 62.

Figura 62 – Mapa *Fuzzy* para padrão de distância de descarte por setor “FUZZY_DI_CENTROIDE_SB”

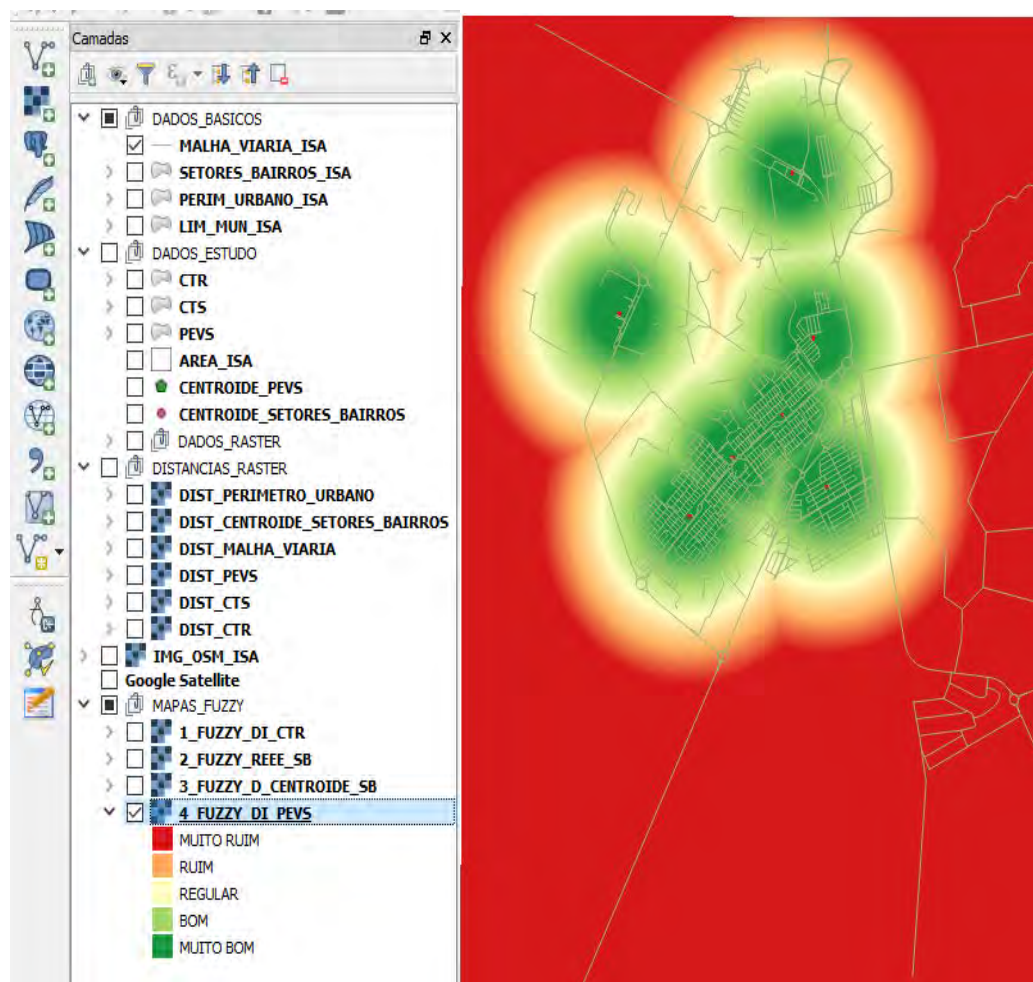


Fonte: Elaborado pela autora

4. **Mapa da distância de cobertura para os pontos de entrega voluntária** denominado de “FUZZY_DI_PEV”. Ordenamento inverso de quanto menor a distância melhor o resultado.

O resultado é apresentado na Figura 63.

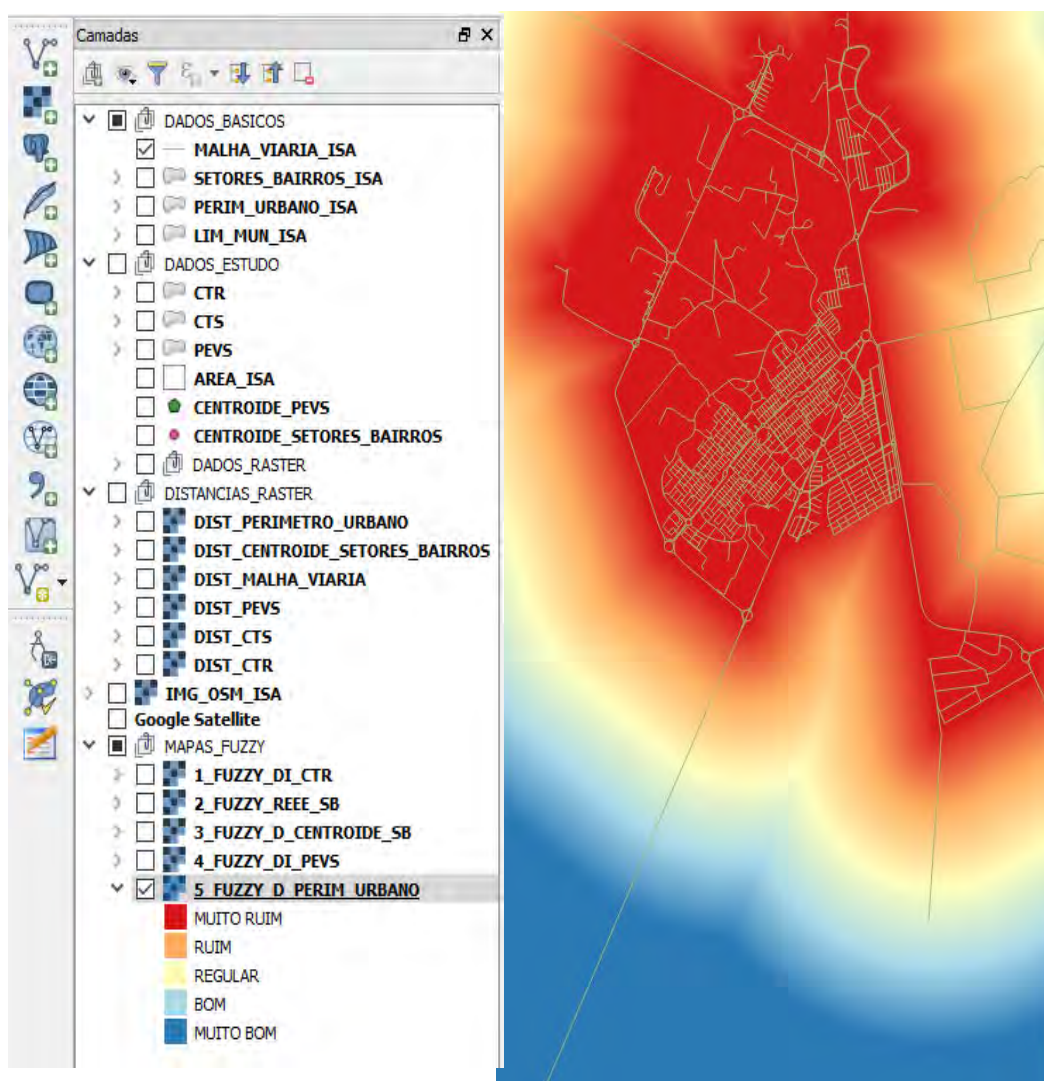
Figura 63 – Mapa *Fuzzy* para padrão de distância aos PEVs “FUZZY_DI_PEVS”



Fonte: Elaborado pela autora

5. **Mapa de distância do perímetro urbano** denominado “FUZZY_D_PERIM_URBANO”. A distância do perímetro urbano deve ser maior que 5 km para atender, de forma equilibrada, as recomendações ambientais, de conforto e custo. O perímetro urbano foi limitado a uma distância de 5,5km, logo $x_a = 0$ e $x_b = 5000m$. O resultado é apresentado na Figura 64.

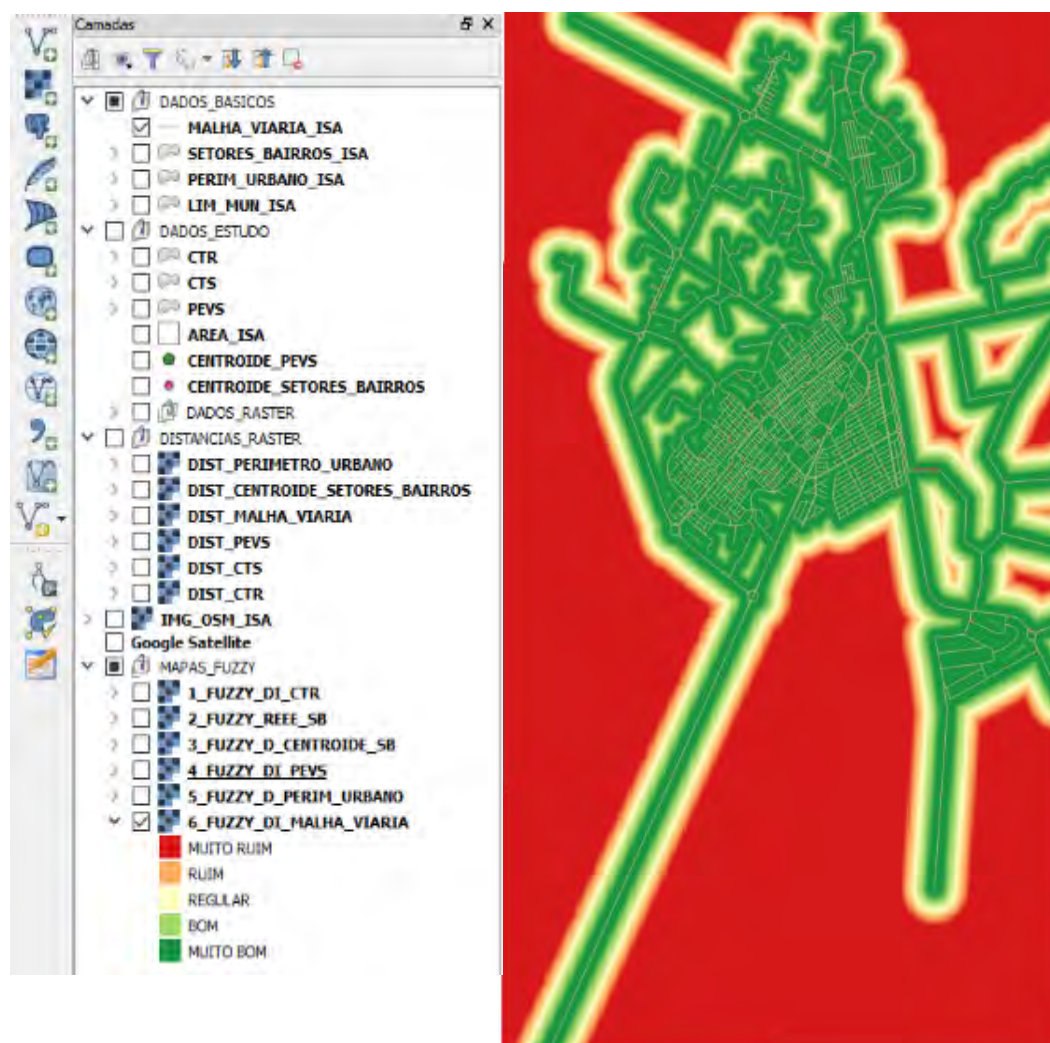
Figura 64 – Mapa *Fuzzy* para padrão de distância do perímetro urbano
“FUZZY_D_PERIM_URBANO”



Fonte: Elaborado pela autora

6. **Mapa de distância da malha viária** denominado de “FUZZY_DI_MALHA_VIARIA”. A distância deve ser menor que 500m. Ordenamento inverso de quanto menor melhor o resultado. Assim $x_a = 100m$ e $x_b = 500m$. O resultado é apresentado na Figura 65.

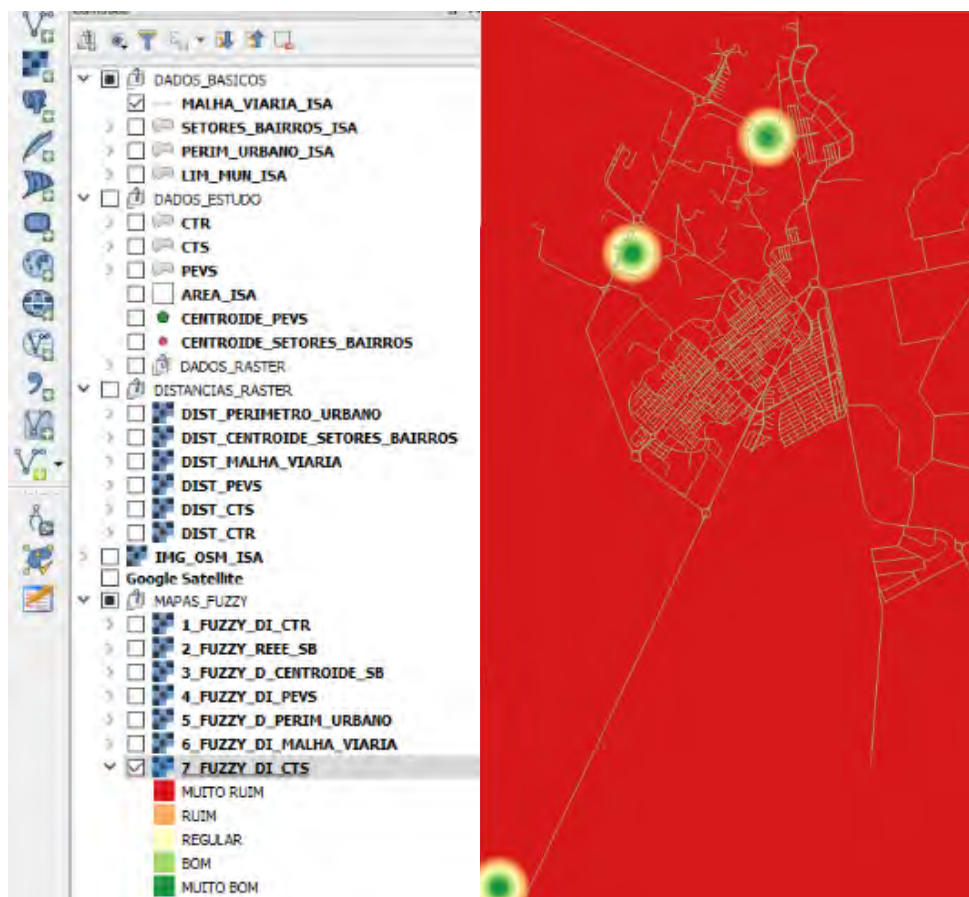
Figura 65 – Mapa *Fuzzy* para padrão de distância da malha viária
“FUZZY_DI_MALHA_VIARIA”



Fonte: Elaborado pela autora

7. **Mapa de distância do centro de tratamento** denominado de “FUZZY_DI_CTS”. A distância deve ser menor que 500m. Ordenamento inverso de quanto menor melhor o resultado. O resultado é apresentado na Figura 66.

Figura 66 – Mapa *Fuzzy* para padrão de distância dos centros de tratamento “FUZZY_DI_CTS”



Fonte: Elaborado pela autora

9.1.4 Aplicação do processo hierárquico analítico PHA e combinação linear ponderada- WLC- para os mapas FUZZY.

O método aplicado, nesta pesquisa, é o de comparação par a par no contexto do processo de tomada de decisão denominado AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Para Ramos (2000) não há um método consensual para a definição de pesos, mas várias propostas de procedimentos para este efeito podem ser encontradas na literatura (VON WINTERFELTDT; EDWARDS, 1986³²; MALCZEWSKI, 1999³³ apud ZAMBON et al. 2005).

Os critérios para localização dos PEVs e Centro de Tratamento par a par, nesta pesquisa, foram definido de acordo com a literatura estudada.

³² VON WINTERFELDT, D. e EDWARDS, W. (1986). *Decision Analysis and Behavioural Research*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

³³ MALCZEWSKI, J. (1999). *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. John Wiley & Sons, New York.

9.1.4.1 Descrição e aplicação dos Critérios para PEVS

De acordo com Guiqin et al. (2009) para um bom funcionamento e para não haver problemas de saúde pública, os aterros sanitários e/ou os Centros de Tratamento não devem ser localizados a menos de 500 m de áreas residenciais. Portanto, uma zona de *buffer* de 500m a partir do Centro de Tratamento.

Outro critério analisado foi a distância da malha viária, que não deve ser maior que 500m e nem menor que 100m de cada lado das rodovias, ferrovias e ruas. Quanto mais perto da malha viária melhor, desde que não seja inferior a 100m.

Para obtenção dos mapas ponderados foi utilizado o algoritmo complementar “Easy AHP”. Os pesos seguem escala (Tabela 16) conforme o grau de importância para combinações pareadas (SAATY, 2005, apud VARGAS, 2010).

Tabela 16 – Escala de ponderação para combinações pareadas

Importância	Definição	Explicação
1	Importância igual	Os dois fatores contribuem igualmente para o
3	Importância moderada	Um fator é ligeiramente mais importante que
5	Importância essencial	Um fator é claramente mais importante que o
7	Importância demonstrada	Um fator é fortemente favorecido na prática
9	Importância extrema	A evidência que diferencia os fatores é da
2,4,6,8	Valores intermediários	Possibilidade de compromissos adicionais

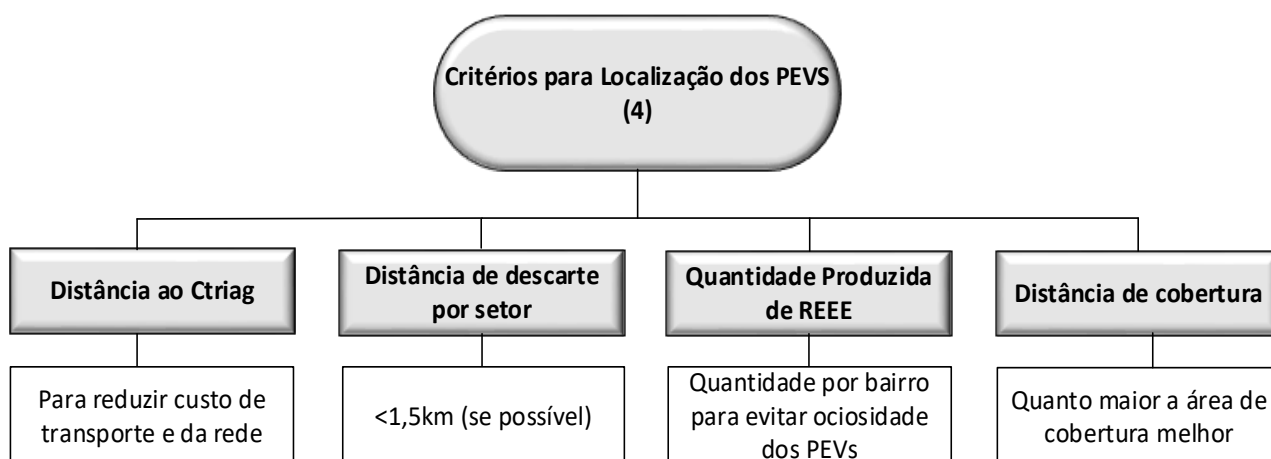
Fonte: Saaty (2005, apud VARGAS, 2010).

9.1.4.2 Mapa ponderado para definição dos pontos de entrega voluntário PEV

Foram usados os seguintes parâmetros (camadas) (Figura 67):

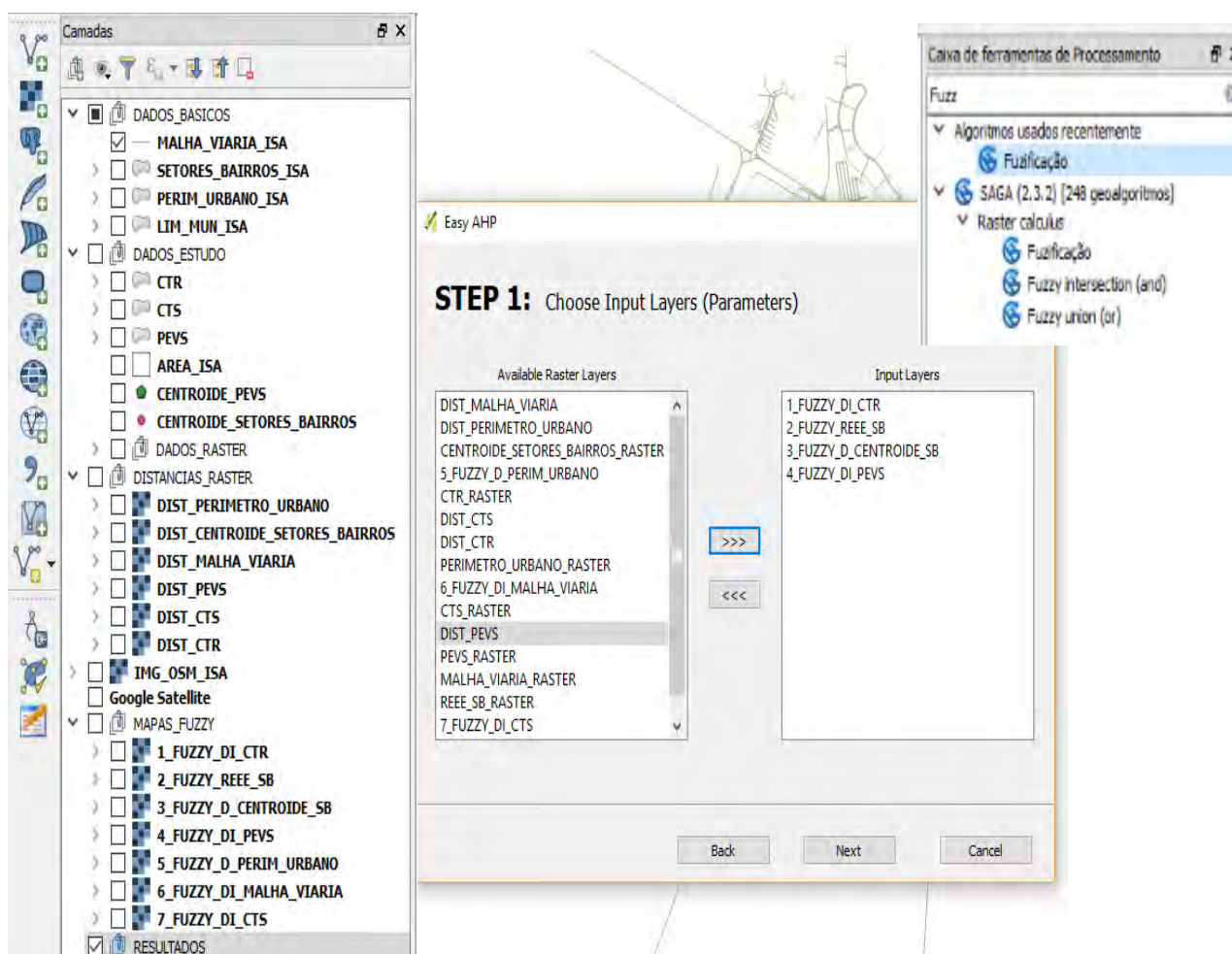
1. Distância ao centro de triagem (1_FUZZY_DI_CTR);
2. Quantidade de REEE por setor (2_FUZZY_REEE_SB);
3. Distância de descarte por setor (3_FUZZY_D_CENTROIDE_SB); e
4. Distância de cobertura dos PEVs (4_FUZZY_DI_PEVs).

A Figura 67 mostra os critérios usados para o PEVS

Figura 67 – Critérios de ponderação para os PEVS

Fonte: Elaborado pela autora

O procedimento consistiu em selecionar os mapas FUZZY correspondentes aos critérios (Figura 68);

Figura 68 – PAH: Seleção dos mapas FUZZY, parâmetros PEVs

Fonte: Elaborado pela autora

9.1.4.3 Atribuição dos pesos na matriz pareada

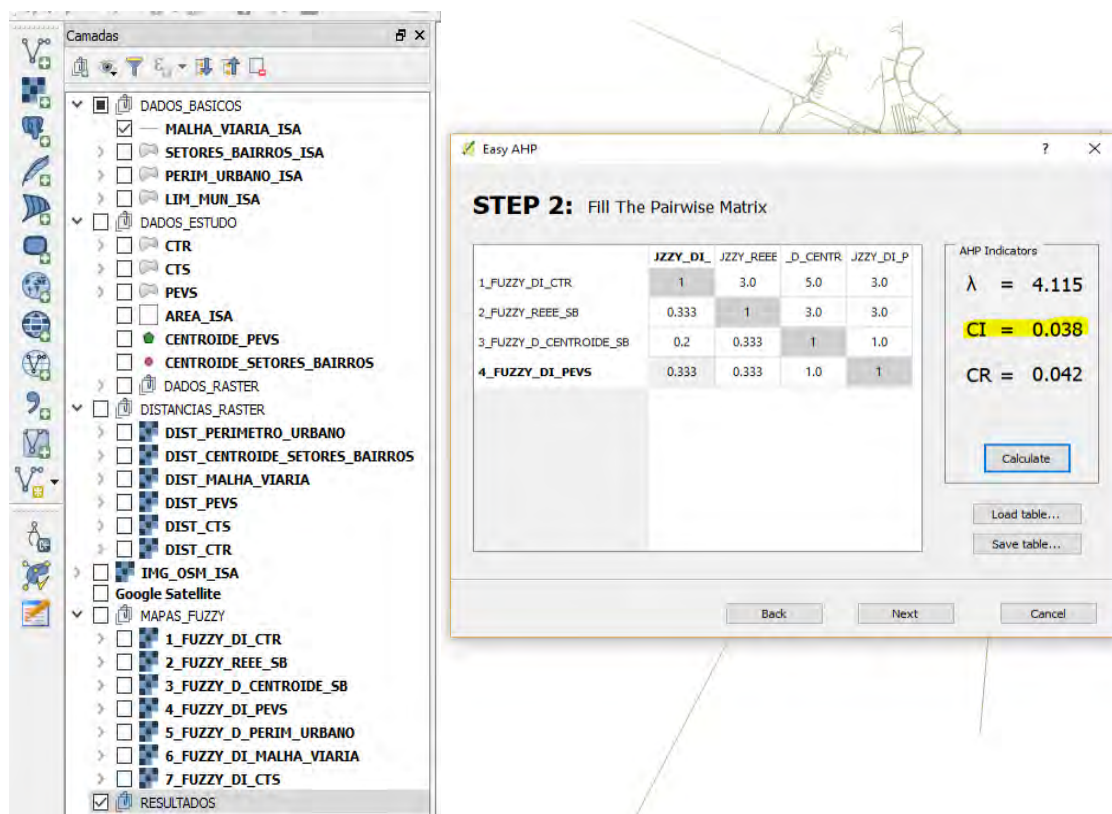
Foram atribuídos pesos para os parâmetros (em função de sua contribuição) e calculado os indicadores de vetor máximo ($\lambda_{\max}$), índice de consistência (CI) e a razão de consistência (CR), (Figura 69). Destaca-se o índice de consistência (CI), que mede a coerência dos julgamentos, isto é, quanto mais próximo de zero, maior a consistência global da matriz de comparação. Segundo Zambom et al. (2005), quando o CR é superior a 0,1, faz-se necessário reavaliar o processo. Nenhuma comparação obteve CR maior que 0,1%. Os pesos estão apresentados na Tabela 17

Tabela 17 - Matriz de comparação PEVs

	Distância ao Centro de Triagem	Quantidade de REEE	Distância de Descarte	Distância de cobertura
Distância ao Centro de Triagem	1	3,0	5,0	3,0
Quantidade de REEE	1/3	1	3,0	3,0
Distância de Descarte	1/5	1/3	1	1
Distância de cobertura	1/3	1/3	1	1

Fonte: Elaborada pela autora

Figura 69 – Pesos dos parâmetros PEVs na matriz pareada e cálculo dos indicadores AHP

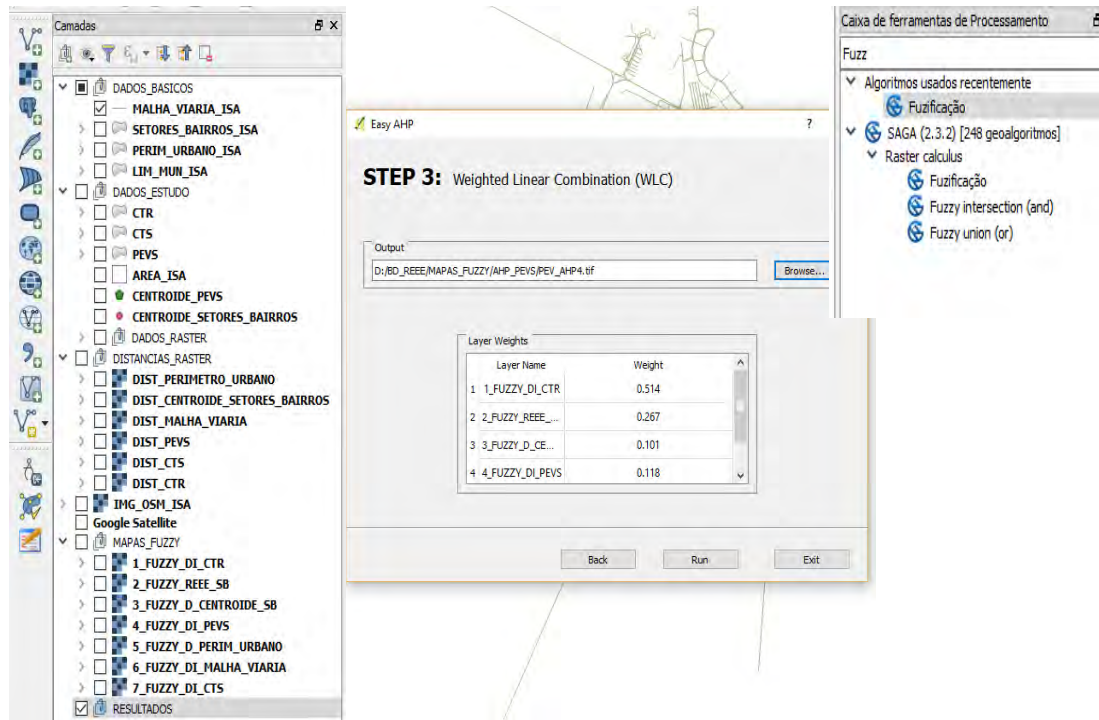


Fonte: Elaborado pela autora

9.1.4.4 Obtenção dos valores da combinação linear ponderada (WLC)

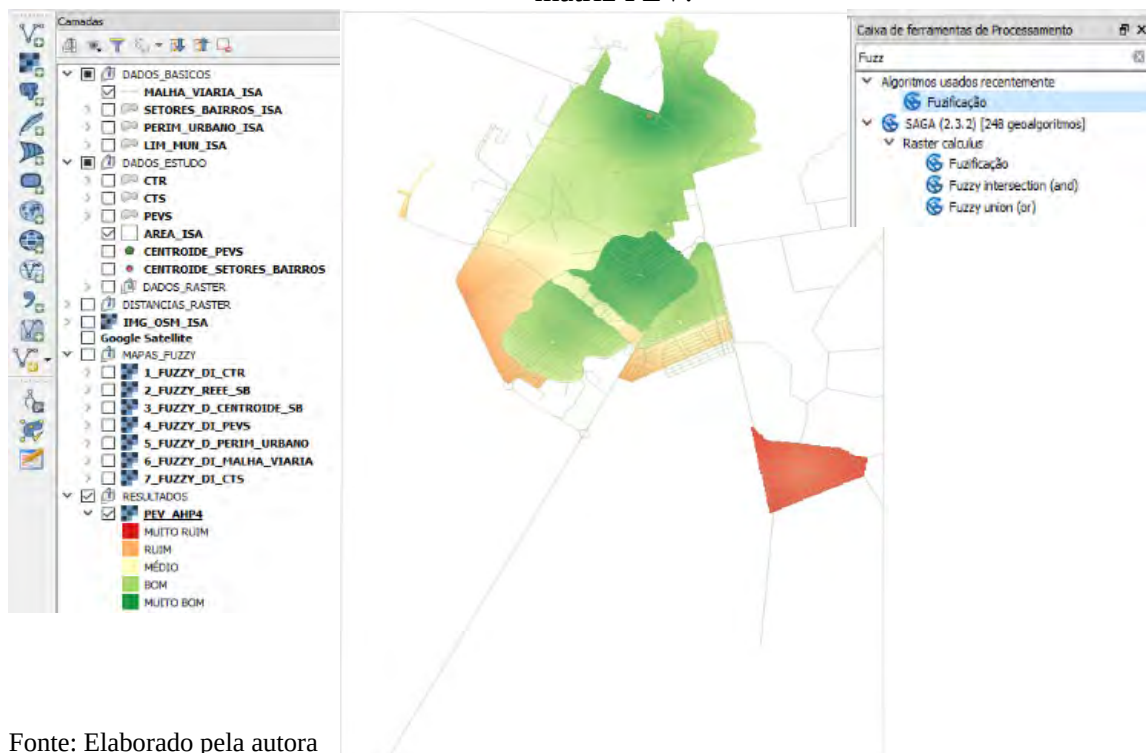
Na Figura 70, apresenta-se a combinação linear ponderada para a matriz pareada PEV e, na Figura 71, é ilustrado o mapa *FUZZY* resultante deste processo.

Figura 70– Resultado da Combinação Linear Ponderada (WLC) para matriz PEV



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 71 – Mapa *FUZZY* “PEV_AHP4” Resultado da Combinação Linear Ponderada para matriz PEV.

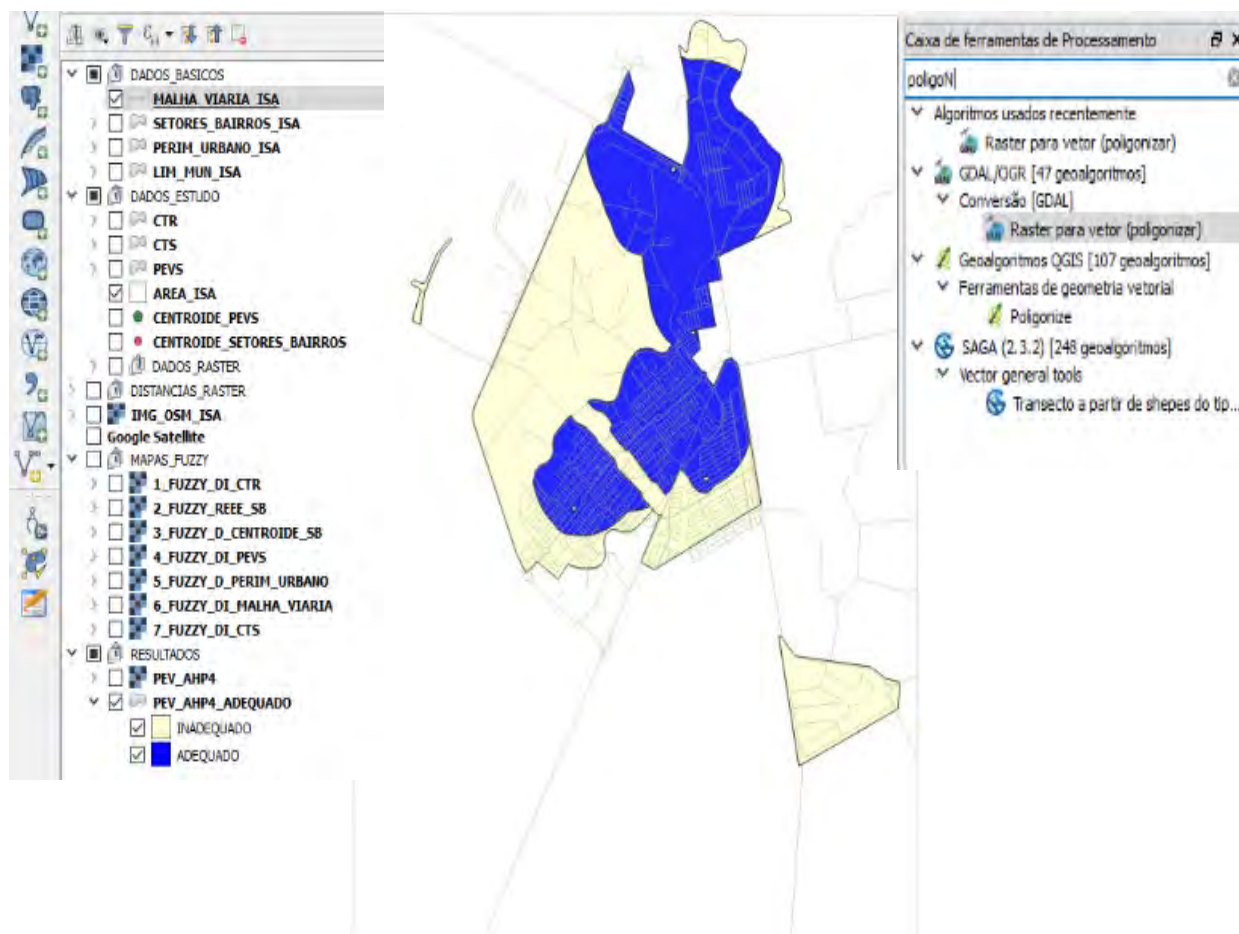


Fonte: Elaborado pela autora

9.1.4.5 Mapa final com a localização dos PEVs

Para refinar o processo de definição dos PEVS, em função dos parâmetros adotados, foi realizado a conversão do mapa *FUZZY* resultante “PEV_AHP4” do formato *raster* para o formato vetorial usando a ferramenta poligonizar do QGIS, resultando em um mapa *BOOLEANO* com os locais adequados, denominado “PEV_AHP4_ADEQUADO”, como ilustrado na Figura 72.

Figura 72 – Mapa com os locais adequados para os PEVs



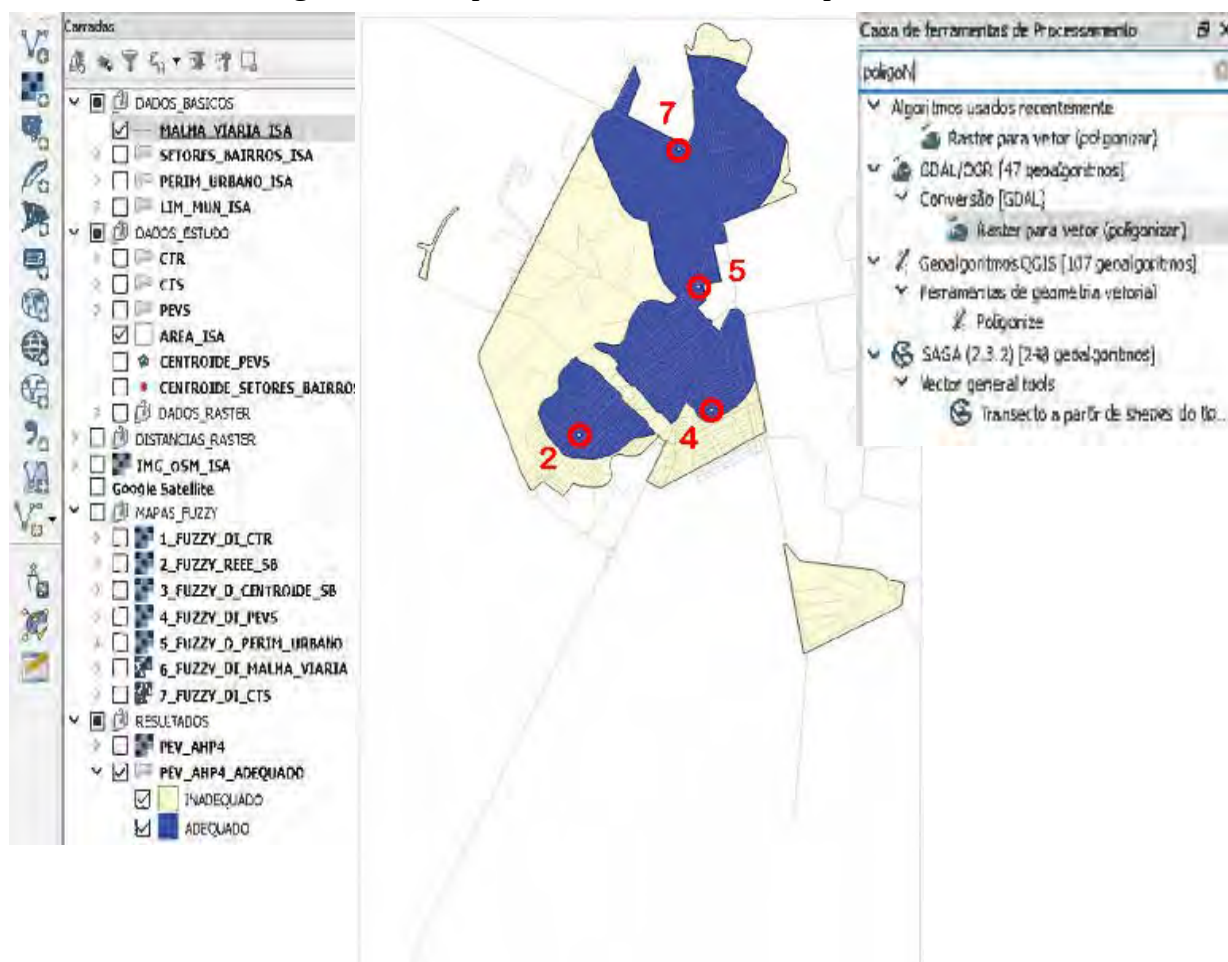
Fonte: Elaborado pela autora

9.1.4.6 Mapa Final com os resultados dos PEVs

O resultado da análise apresenta como favorável os PEVS: (2) Urubupungá, (3) Arno Hauser, (4) EMEI Jd. Aeroporto, (5) C.C. Novo Horizonte e (7) Cooperseli. Sendo escolhido 4 PEVs (2), (4), (5) e (7). Por apresentarem melhor configuração geométrica.

O resultado é apresentado na Figura 73.

Figura 73 – Mapa com os locais indicados para os PEVS



Fonte: Elaborado pela autora

9.1.5 Mapa ponderado para definição dos centros de tratamento CTS.

Os locais pré-selecionados para o Centro do Tratamento foram definidos de acordo com o plano diretor do município, assim:

1. Centro de Tratamento junto a Cooperseli (Ctrat-0) – segundo o plano de zoneamento do município a cooperativa está localizada numa zona urbana de comércio e serviços pesados (ZUCP). Não está próximo a áreas de preservação permanente. Localiza-se próximo à malha viária e próximo à área urbana;

2. Centro de Tratamento junto ao Aterro Sanitário (CTRAT-1) – local já estudado por causa das condições ambientais para localização do aterro sanitário, também já possui equipamentos para tratamento de chorume e proteção dos odores emitidos pela decomposição do lixo. Localiza-se distante da área urbana, mas próximo à malha viária.

3. Centro de Tratamento junto a Escola Técnica de Ilha Solteira –ETEC (CTRAT-2) – segundo o plano de zoneamento do município, o local é uma zona urbana de indústrias pesadas (ZUIP), mas ficaria próximo à zona rural de uso agrícola e ao córrego da Rocinha e

do Pernilongo, condições essa que podem limitar sua escolha, outro, porém é que se localizam próximo à área urbana e próximo à malha viária (Plano Diretor do Município de Ilha Solteira).

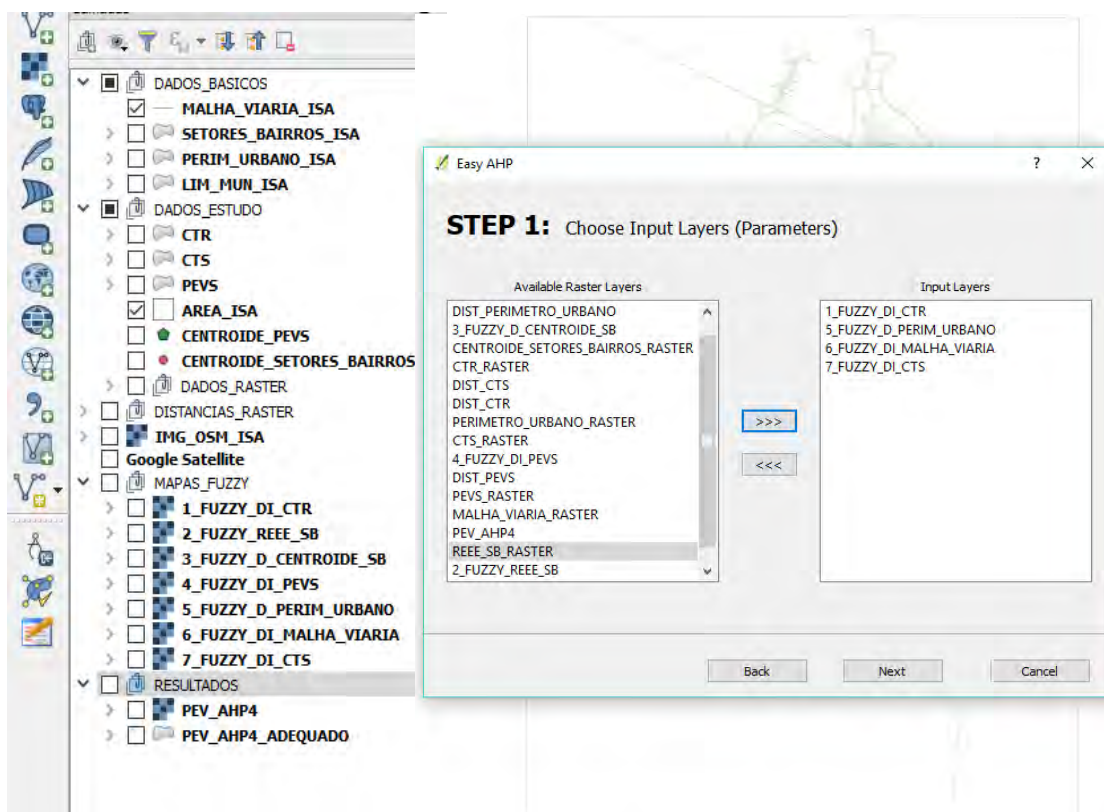
O critério para a localização do Centro de Tratamento, além da verificação do local proposto pelo plano diretor e das condições de preservação ambiental, corresponde aos critérios: maior distância possível à área urbana (evitando cheiro, barulho, danos à saúde pública, entre outros), mínima distância ao Centro de Triagem e à malha viária, mínimo de 100m e máximo de 500 m, para não atrapalhar o descarregamento e o processamento dos resíduos e nem o fluxo da rodovia. É importante lembrar, também, que o centro de tratamento precisa de uma área mínima de 500m² (GUIQUIN; et al., 2009).

Foram usados os seguintes parâmetros (camadas):

1. Distância ao centro de triagem (1_FUZZY_DI_CTR);
2. Distância do perímetro urbano (5_FUZZY_D_PERIM_URBANO);
3. Distância da malha viária (6_FUZZY_DI_MALHA_VIARIA); e
4. Distância do centro de tratamento (7_FUZZY_DI_CTS)

O procedimento consistiu em selecionar os mapas *FUZZY* correspondentes aos critérios. A Figura 74 apresenta a seleção dos mapas;

Figura 74 – AHP: Seleção dos mapas *FUZZY*, parâmetros CTS

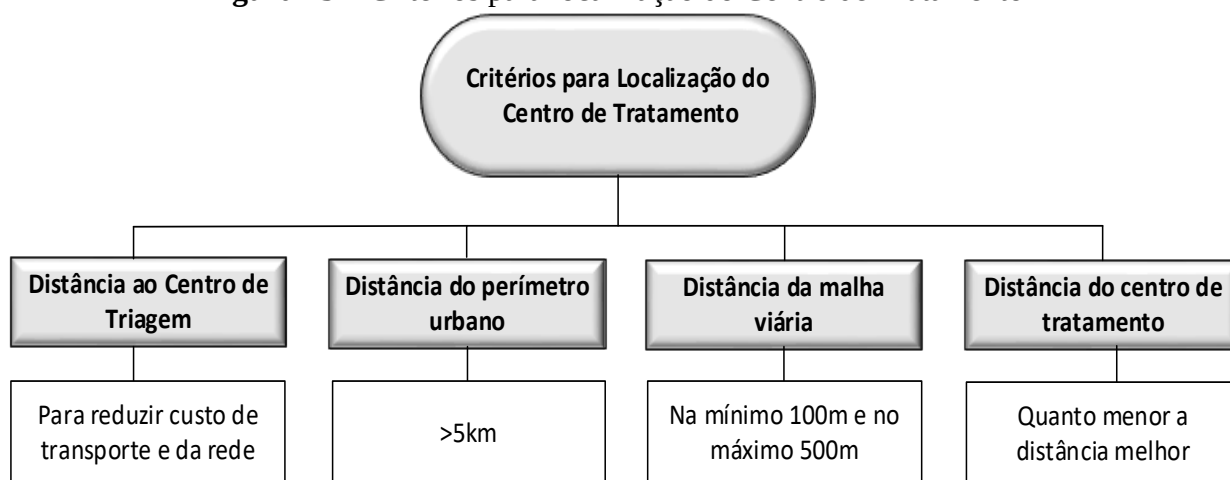


Fonte: Elaborado pela autora

9.1.5.1 Atribuição dos pesos na matriz pareada

Foram atribuídos pesos para os parâmetros definidos (Figura 74 e Tabela 18) (em função de sua contribuição) e calculados os indicadores de vetor máximo (λ_{max}), índice de consistência (CI) e a razão de consistência (CR). Destaca-se o índice de consistência (CI), que mede a coerência dos julgamentos, isto é, quanto mais próximo de zero, maior será a consistência global da matriz de comparação.

Figura 75 – Critérios para localização do Centro de Tratamento



Fonte: Elaborado pela autora

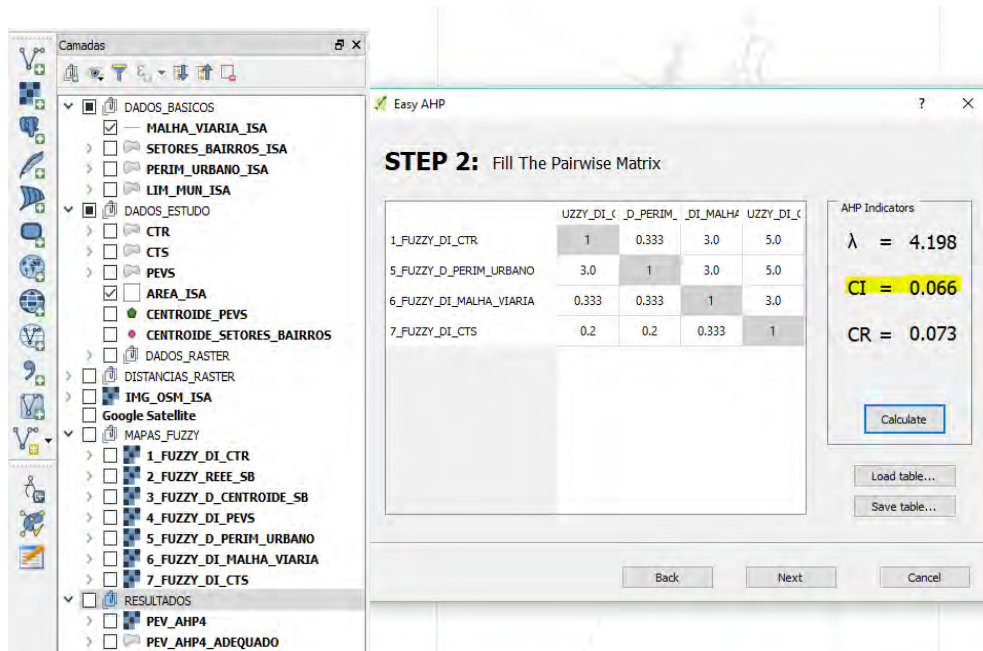
Tabela 18 - Matriz de comparação Centro Tratamento

	Distância ao Centro de Triagem	Distância do Perímetro urbano	Distância da Malha viária	Distância do Centro de Tratamento
Distância ao Centro de triagem	1	1/3	3,0	5,0
Distância ao Perímetro. Urbano	3,0	1	3,0	5,0
Distância a Malha viária	1/3	1/3	1	3,0
Distância ao. Centro de Tratamento	1/5	1/5	1/3	1

Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 76 apresenta a matriz pareada.

Figura 76 – Pesos dos parâmetros CTS na matriz pareada e cálculo dos indicadores PHA

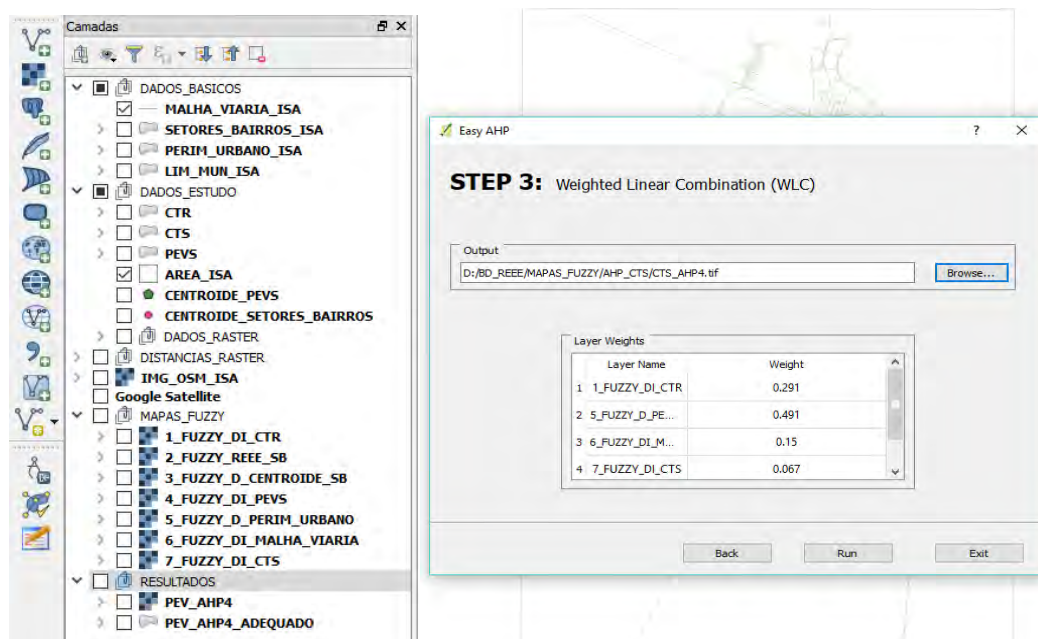


Fonte: Elaborado pela autora

9.1.5.2 Obtenção dos valores da combinação linear ponderada (WLC)

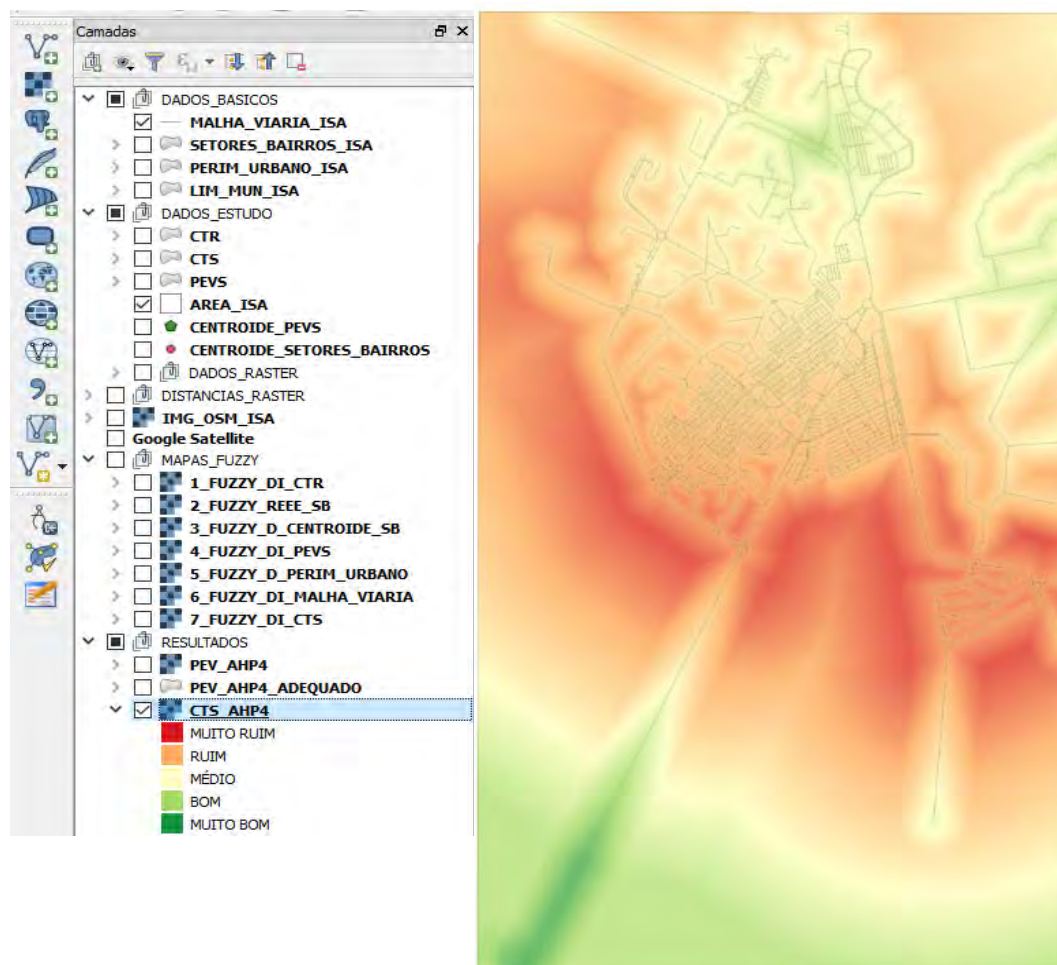
Foram obtidos os valores da combinação linear ponderada (WLC) para a matriz pareada CTS (Figura 77) e do mapa FUZZY “CTS_AHP4” resultante do processo (Figura 78).

Figura 77 – Resultado da Combinação Linear Ponderada (WLC) para matriz CTS



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 78 – Mapa *FUZZY* resultado da Combinação Linear Ponderada (WLC) para matriz CTS

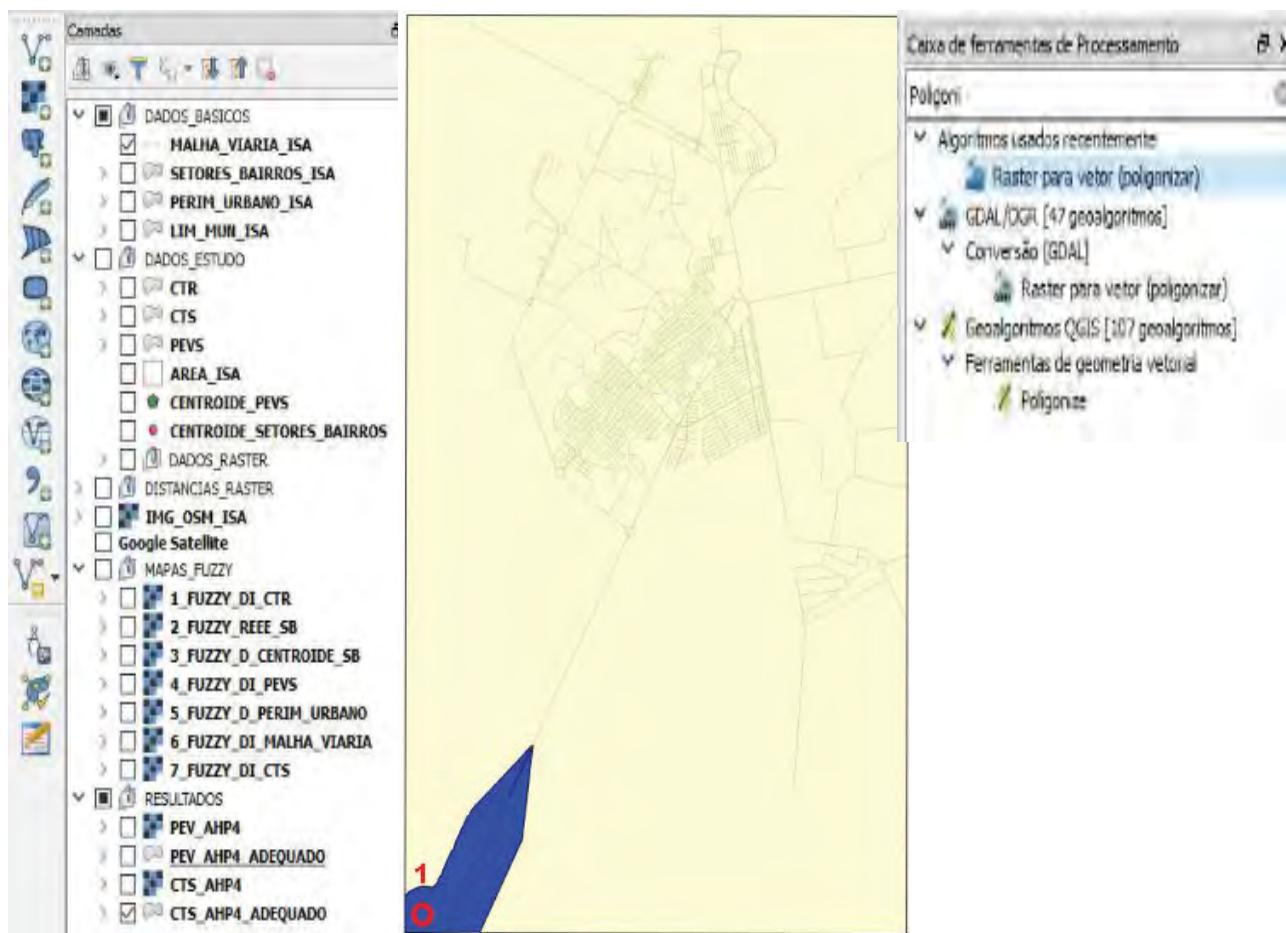


Fonte: Elaborado pela autora

Para refinar o processo de definição dos CTS, em função dos parâmetros adotados, foi realizada a conversão do mapa *FUZZY* resultante “CTS_AHP4” do formato *raster* para o formato vetorial usando a ferramenta poligonizar do QGIS, resultando em um mapa *BOOLEANO* com os locais adequados, denominado “CTS_AHP4_ADEQUADO”.

A Figura 79 mostra o resultado final.

Figura 79 – Mapa com os locais adequados para os CTS



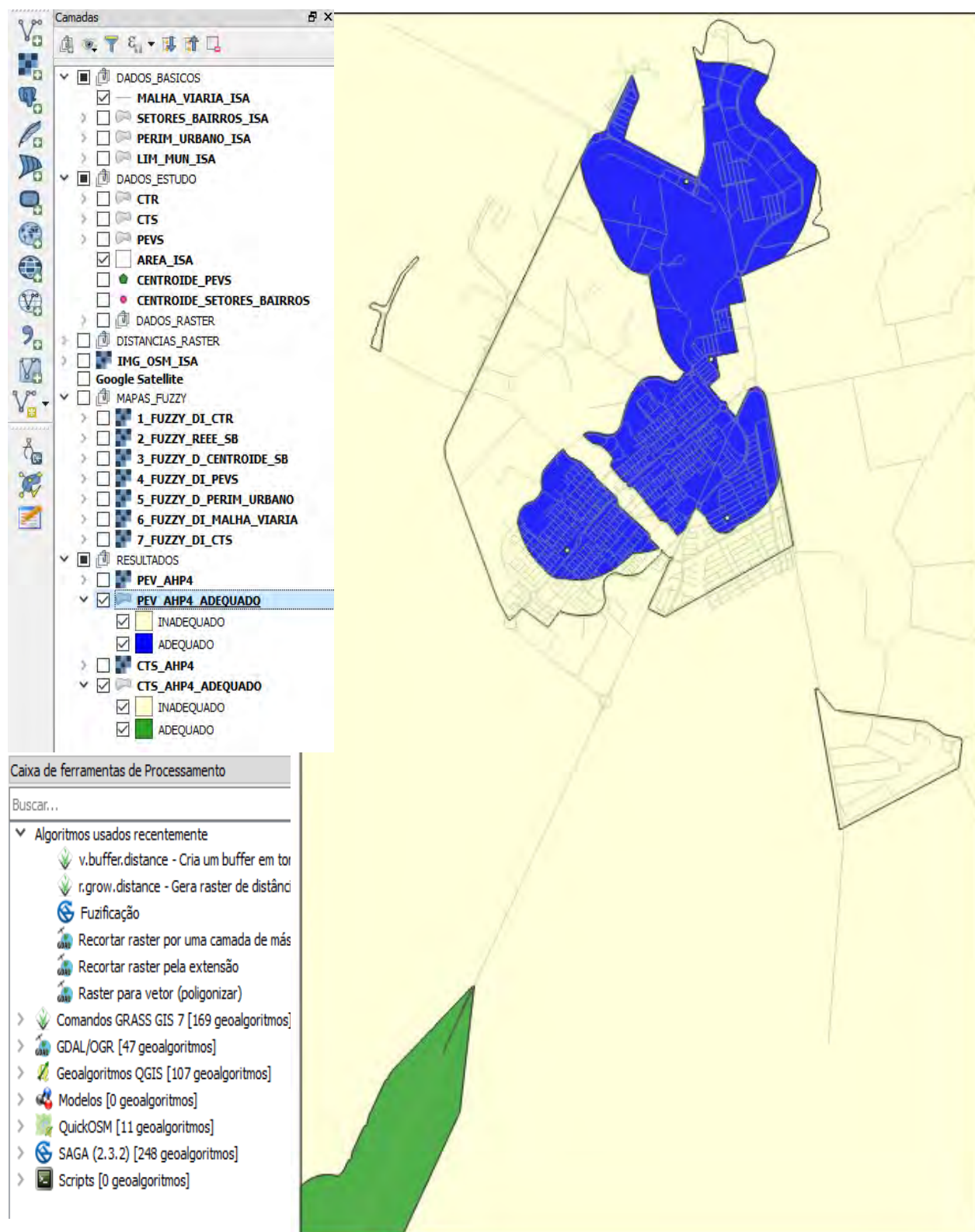
Fonte: Elaborado pela autora

9.1.5.3 *Mapa Final com os resultados dos PEVs e Centro de Tratamento*

Neste caso, o resultado da análise apresenta-se como favorável à região do CT1 Aterro Sanitário.

Na Figura 80 ilustra-se o mapa com o resultado final, ou seja, os PEVs, Centro de Triagem e Centro de Tratamento.

Figura 80 – Resultado final da rede reversa



Fonte: Elaborado pela autora

Após a definição das localizações dos PEVS, do Centro de Triagem e do centro de Tratamento, e já com o volume de REEE produzidos, com o custo do Transporte por tonelada coletada e transportada, pode-se calcular o custo da rede.

Lembrando que, o objetivo é minimizar os custos de transporte, maximizar a distância do Centro de tratamento à área urbana e minimizar a distância do Centro de triagem ao centro de tratamento.

O custo final da rede, com os PEVs localizados no Zona Sul (PEV2), no Jardim Aeroporto (PEV4), no Jardim Novo Horizonte (PEV5) e mantendo a possibilidade de o Centro de Triagem funcionar como Ponto de Entrega Voluntária (PEV7), e o Centro de Tratamento situado no Aterro Sanitário, está representado na tabela 19; os dados para os cálculos estão no Apêndice A.

Tabela 19 – Custo final da rede proposta

Rede Reversa para REEE					
	PEV2	PEV5	PEV4	PEV7	CTRAT-1
População (hab)	6488	11151	4981	2172	
Volume Produzido (kg)	16868,8	28992,6	12950,6	5647,2	
Distancia (m)	8994	3833	4856	1	13606
Custo transporte (/m)	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
CUSTO TOTAL =	R\$ 5.683.688,59				

Fonte: Elaborado pela autora

Outro fator importante para o funcionamento da rede de coleta é a participação da sociedade. Por isso, quando considerado o critério distância de descarte, a localização do PEV3 (Zona Norte), que possui a maior concentração de REEE produzido, cede o local para o PEV5, melhorando a distribuição geográfica e, conseqüentemente, reduzindo a distância de caminhada do cidadão. Mantendo-se os 7 PEVs, o custo da rede iria para R\$ 6.489.811,37.

Este projeto denominado “C_REEE” foi armazenado na pasta BD_REEE que contém o banco de dados do projeto e todos os arquivos separados em pastas conforme padrão técnico do LTP/UNESP e o link para acesso se encontra no Apêndice B.

As pastas contém os dados básicos de entrada, os dados derivados referentes ao estudo, e os mapas do processamento e resultados obtidos.

10 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A crescente geração de resíduos sólidos, no mundo, é um dos maiores desafios enfrentados pelas autoridades governamentais. O desenvolvimento de um modelo para auxiliar o gerenciamento de resíduos sólidos é importante, tanto do ponto de vista da saúde pública, quanto para a economia dos municípios, além de reduzir os impactos ao meio ambiente.

A integração da análise espacial, por meio do SIG, da análise hierárquica AHP e da lógica *fuzzy* para a escolha dos locais para os PEVs e para o centro de tratamento, permitiu um resultado claro e conciso, auxiliando na escolha do melhor local.

No planejamento de gerenciamento de resíduos sólidos, a metodologia de localização assistida, adotada nesta pesquisa, pode permitir a expansão da rede para outras cidades de maior porte, uma vez que a tecnologia SIG permite a aquisição de dados, armazenamento, recuperação, manipulação, assim como análise das informações, ou seja, outros critérios podem ser inseridos ou retirados ou, ainda, trocados para que possam atender as necessidades de cada região e assim, dar suporte as tomadas de decisões, auxiliando o plano de gerenciamento de resíduos do município.

Ao se incluir, na avaliação do SIG, a análise AHP, foi possível atribuir pesos aos critérios e analisá-los par a par, criando modelos de normalização para todos os fatores considerados. Além disso, o uso do conjunto de pesos proporcionou grande flexibilidade no procedimento de agregação dos mapas finais.

A lógica *fuzzy*, por meio do processo de fuzzificação, permitiu que um conjunto de valores pudesse ser expresso numa escala normalizada entre 0 e 1, tornando-os comparáveis, funcionando como um processo de normalização.

O uso da teoria dos conjuntos *fuzzy* melhora o processo de tomada de decisão, considerando-se a imprecisão e a ambiguidade prevaletentes em sistemas de logística reversa. O uso dos conjuntos *fuzzy* triangulares possibilitou a interpretação dos dados e dos resultados finais, de forma mais clara, visando à escolha dos locais. Além disso, o método proposto é melhorado quando adicionadas as avaliações linguísticas *fuzzy*.

Na matriz PHA dos critérios usados, nesta pesquisa, não é fixo. Outros pesos e fatores podem ser modificados de acordo com o processo de análise e das condições locais. Essa flexibilidade permitiu a seleção de um local compatível com as características do município estudado.

É importante observar que a decisão de onde localizar um centro de tratamento ou um PEV é, muitas vezes, uma questão política e não apenas científica e depende fortemente do apoio da sociedade para que a rede reversa funcione e se mantenha. Por isso, limitou-se a distância de descarte de 1,5 km, pois assim, acredita-se que seja possível garantir que os cidadãos irão ao PEVS descartar seus REEE, e garantir o bom funcionamento da rede.

Uma limitação deste método, é que depende dos julgamentos de especialistas na definição dos pesos. É possível que em certas situações, haja julgamentos contraditórios sobre o peso de um fator. Portanto, é importante que as pessoas com conhecimentos locais estejam envolvidas no projeto para garantir que os resultados sejam adequados para o contexto local.

Os resultados obtidos indicaram que a modelagem espacial utilizando a lógica *fuzzy* foi adequada para mapear a rede reversa. Na metodologia utilizada, o uso da técnica de AHP, que converteu os dados empíricos qualitativos inerentes ao pesquisador em valores de significância numérica, foi determinante no tratamento dos dados utilizados para o mapeamento da escolha das localizações dos PEVs e do Centro de Tratamento.

Os resultados alcançados mostraram, também, que os fatores escolhidos para a definição da rede permitiram que esta obtivesse o melhor custo-benefício, pois mesmo mantendo o Centro de tratamento distante do Centro de triagem, a questão ambiental e a distância dos bairros prevaleceram e foram determinantes.

Tendo em vista a importância dos dados gerados, uma vez que estudos semelhantes não foram realizados para a implantação de uma rede reversa de REEE, sugere-se a inclusão de outros critérios ou, ainda, a aplicação da rede reversa para outros produtos e para outros municípios permitindo auxiliar na gestão dos resíduos sólidos dos municípios pelos órgãos competentes.

Concluiu-se que a metodologia proposta atingiu o objetivo de apoiar o tomador de decisão na resolução do problema de gerenciamento de REEE. Notou-se, também, que a rede pode ser adaptada a qualquer município de pequeno porte, ou a bairros de cidades de grande porte. As definições adequadas dos equipamentos da coleta da rede reversa são fundamentais para esta se manter e para que o sistema de gerenciamento de resíduos municipais seja econômica, social e ambientalmente viável.

REFERÊNCIAS

- AGENCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL– ABDI. **Logística reversa de equipamentos eletroeletrônicos**: análise de viabilidade técnica e econômica. Brasília, DF: Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. nov. 2012. 179 p.
- CONFERÊNCIA DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. Resolução nº 44/228 da Assembléia Geral da ONU, de 22-12-89, Estabelece uma abordagem equilibrada e integrada das questões relativas a meio ambiente e desenvolvimento: a Agenda 21. Senado Federal, Subsecretaria de Edições Técnicas, Brasília, 1996. 585p.
- AL-JARRAH, O; ABU-QDAIS, H. Municipal solid waste landfill siting using intelligent system. **Waste Management**, Kidlington, v. 26, n. 3 p. 299–306, 2006. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/wasman>. Acessado em: 15 jun 2016.
- ALUMUR S. A.; NICKEL S.; SALDANHA-DA-GAMA F.; VERTER, V. Production, Manufacturing and Logistics Multi-period reverse logistics network design. **European Journal of Operational Research**, North-Holland, v. 220, n. 1, p. 67–78, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA- ABINEE. **Avaliação setorial**: desempenho setorial, 1 trimestre. [S.l.: s.n.], 2010. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br>>. Acesso em: 15 jun.2010
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR ISO 14001**: sistema de gestão ambiental – especificação e diretrizes para uso. Rio de Janeiro, 2004
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. **NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004c
- BABALOLA, A.; BUSU, I. Selection of landfill sites for solid waste treatment in damaturu town-using GIS techniques. **Journal of Environmental Protection**, Irvine, v. 2, n. 1, p. 1-10, 2011. Disponível em: <https://file.scirp.org/pdf/JEP20110100012_41385116.pdf>. Acessado em: 15 maio 2017.
- BAI, Y; WANG, D. **Fundamentals of Fuzzy Logic control**: *Fuzzy sets, Fuzzy rules and defuzzifications*. In: *ADVANCED Fuzzy logic technologies in industrial applications*. [S.l.]: Springer. cap. 2. 2006. p. 17-36. Disponível em: <<http://springer.com/978-1-84628-468-7>>. Acesso em 5 abr. 2015.
- BALLOU, R. H. **Logística empresarial**. São Paulo: Atlas, 2005. 373 p.
- BARBIERI, J. C. **Gestão ambiental empresarial**: conceitos modelos e instrumentos. 2 ed. São Paulo: Saraiva. 2007. 328 p.
- BARKER, T. J., ZABINSKY, Z. B. A multi-criteria decision making model for reverse logistics using analytical hierarchy process. **Omega**, Kidlington, v. 39, n. 5, p. 558-573, 2011.

BARROS, A. I.; DEKKER, R; SCHOLTEN, V. A two-level network for recycling sand: a case study. **European Journal of Operational Research**, v. 110, n. 2, p. 199-214. 1998.

BARROS, A. J. da S.; LEHFELD, N. A. de S. **Fundamentos de metodologia científica: um guia para a iniciação científica**. 2. ed. São Paulo: Makron Books, 2000. 158 p.

BARROS, L.C.; BASSANEZI, R. C. Tópicos de lógica Fuzzy e biomatemática. CONGRESSO BIOMATEMÁTICA. GRUPO BIOMATEMÁTICA, 13., 2003, Campinas. **Congresso...** Campina: UNICAMP/IMECC, 2003. p. 85-89. Disponível em: <http://www.ime.unicamp.br/~biomat/bio13art_9.pdf>. Acessado em : 20 set. 2014.

BESKESE, A.; DEMIR, H. H.; OZCAN, H. K; OKTEN, H. E. Landfill site selection using fuzzy AHP and *fuzzy* TOPSIS: A case study for Istanbul. **Environmental Earth Sciences**, Berlin Heidelberg, v. 73, n. 7, p. 3513- 3521, 2015.

BEVILACQUA, M.; D'AMORE, A.; POLONARA, F. A multi-criteria decision approach to choosing the optimal blanching-freezing system. **Journal of Food Engineering**, London, v. 63, p. 253-263; 2004

BEZDEK, J.; KELLER, J.; KRISNAPURAM, R.; PAL, N. **Fuzzy models and algorithms for pattern recognition and image processing: the handbooks of Fuzzy sets**. Berlin: Springer Science, 1999. 776 p. (Book 4).

BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. **Conceitos básicos de resíduos sólidos**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos- Universidade de São Paulo, 1999. 109 p.

BILICH, F., DASILVA, R. Análise multicritério da produção de biodiesel. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO- SIMPEP, 13., 2006, Bauru. **Anais...** Bauru: UNESP, 2006. Disponível em: <http://www.simpep.feb.unesp.br/anais/anais_13/artigos/635.pdf>. Acessado em: 7 fev. 2017.

BIT, A. K.; BISWAL, M. P; ALAM, S. S. *Fuzzy* programming approach to multiobjective solid transportation problem. **Fuzzy Sets and Systems**, North-Holland, v. 57, n. 2, p. 183-194. 1993

BORGES, A. Lixo eletrônico vira montanha de problemas. **Computerworld**, n. 421, 2004. Disponível em: <<http://computerworld.uol.com.br/mercado/2004/11/29>>. Acesso em: 15 jun. 2010.

BOWERSOX, D J. **Logistical management: a systems integration of physical distribution, manufacturing support and materials procurement**. New York: MacMillan, 1986. 688 p.

BRASIL. Lei nº 12.305/10 de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos: altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/12305.htm>. Acesso em: 12 ago. 2010.

BRITO, M. P. de; FLAPPER, S. D. P.; DEKKER, R. Reverse Logistics: a review of cases studies. **Economics and Mathematical Systems**, Berlin, v. 544, p. 32, 2005. Disponível em:

<<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=139BD105D44281AE9169E8B3BE0D00D0?doi=10.1.1.18.2439&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2011.

BRITO, M. P.; DEKKER, R. **Reverse logistics: a framework**. Erasmus: Econometric Institute Report, 2002. v.38, 19 p.

BRITO, M. P. **Management reverse logistics or reversing logistics management**. Erasmus: Econometric Institute Report, 2003. 327 p.

BRUNDTLAND. **Our common future**. EUA: Oxford University Press, 1987. 383 p.

CÂMARA, G.; DAVIS, C. **Geoprocessamento: teoria e aplicações**. [S.l.: s.n., 200-]. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap1-introducao.pdf>>. Acessado em: 20 jan. 2011.

CÂMARA, G.; MOREIRA, F. R.; BARBOSA, C. C.; ALMEIDA FILHO, R.; BÖNISCH, S. Inferência geográfica e suporte à decisão. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Ed.). **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001. p. 48. (INPE-8567- PRE/4311). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/sergio/2004/04.19.15.04>>. Acesso em: 20 jun. 2010.

CARTER, C. R.; ELLRAM, L. M. Reverse Logistics: a review of the literature and framework for future investigation. **Journal of Business Logistics**, Hoboken, v. 19, n. 1, p. 85-103, 1998.

CARVALHO, M. V. A. **Aplicação de técnicas de geoprocessamento para análise de susceptibilidade aos escorregamentos no parque Nacional da Tijuca (RJ)**. Niterói. Universidade Federal Fluminense- UFF, 2010. Disponível em: <http://wiki.dpi.inpe.br/doku.php?id=ser300:marcus_vinicius>. Acessado em: 15 set. 2010.

CAVALCANTE, C. A. V.; ALMEIDA, A. T. Modelo multicritério de apoio a decisão para o planejamento de manutenção preventiva utilizando PROMETHEE II em situações de incerteza. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 2, p. 279-296, 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/%0D/pope/v25n2/25710.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2015.

CENTRO MINEIRO DE REFERÊNCIA EM RESÍDUOS– CMRR. **Resíduos em referência: gestão de resíduos e sustentabilidade**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente-FEAM, 2010.

CHAN, F. T. S., KUMAR, N. Global supplier development considering risk factors using fuzzy extended AHP-based approach. **Omega**, Kidlington, v. 35, n. 4, p. 417–431, 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030504830500112X>> Acesso em: 20 jun. 2016.

CHANG, N.B; WEI, Y. L. Siting recycling drop-off stations in urban area by genetic algorithm-based fuzzy multiobjective nonlinear integer programming modeling, **Fuzzy Sets and Systems**, North-Holland, v.114, n. 1, p. 133-149, 2000.

CHARNPRACTHEEP, K.; ZHOU, Q.; GARNER, B. Preliminary landfill site screening using fuzzy geographical information systems. **Waste Management Resíduos**, London, v. 15, n. 2, p. 197–215. 1997. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0734242X9701500207>>. Acesso em: 6 jul. 2015.

CHEN, Y. W.; WANG, C. H.; LIN, S. J. A multi-objective geographic information system for route selection of nuclear waste transport. **International Journal of management Science, Ghaziabad**, v. 36, n. 3, n.p., 2006. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/omega>. Acessado em: 15 mar 2017.

CHRISTEN, K. New state-level e-waste Recycling Law. **Environmental Science & Technology, Government watch**, Dordrecht, v. 40, n. 13, p. 4051, 2006.

CHOUDHARY, D. SHANKAR, R. An steep-fuzzy AHP-TOPSIS framework for evaluation and selection of thermal power plant location: a case study from India. **Energy**, Rondebosch, v. 42, n. 1, p. 510- 521, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/257176729_An_STEEP-fuzzy_AHP-TOPSIS_framework_for_evaluation_and_selection_of_thermal_power_plant_location_A_case_study_from_India. Acessado em: 15 maio 2017.

COUNCIL OF LOGISTICS MANAGEMENT- CLM. **Reuse and recycling reverse logistics opportunities**. Illinois: Council of Logistics Management, 1993.

D'ALMEIDA, M. L. O.; VILHENA (Coord.). **Lixo municipal**: manual de gerenciamento integrado. 2. ed. São Paulo: CEMPRE, 2000. 370 p.

DAS, K.; CHOWDHURY, A. H. Designing a reverse logistics network for optimal collection, recovery and quality-based product-mix planning. **International Journal Production Economics**, Amsterdam, v. 135, n.1, p. 209-212, 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527311003094>>. Acesso em: 3 ago 2016.

DEKKER, R.; FLEISCHMANN, M.; INDERFURTH, K.; VAN WASSENHOVE, L. N. **Reverse logistics**: quantitative models for closed-loop supply chains. New York: Springer-Verlag, 2004. 390 p.

DEMESOUKA, O. E.; VAVATSIKOS, A. P.; ANAGNOSTOPOULOS, K. P. Suitability analysis for siting MSW landfills and its multicriteria spatial decision support system: method, implementation and case study. **Waste Management**, Kidlington, v. 33, n. 5, p. 1190-1206, 2013. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ShoppingCartURL&_method=add&_eid=1-s2.0-S0956053X13000603&originContentFamily=serial&_origin=article&_ts=1500992669&md5=65811eebae5be1f2eb8e2152295af3d2>. Acessado em: 15 maio 2017.

DEUTSCHE WELLE BRASIL. **União Europeia discute o lixo eletrônico**. [S.l.: s.n.], 2004. Disponível em: <<http://www.reciclaveis.com.br/noticias/.htm>>. Acesso em: 18 jun.2010.

DÖBEREINER, C. **Gerenciamento ambiental**. Techoje: [s.n.], 2002. Disponível em: <<http://www.techoje.com.br/site/techoje/categoria/abrirPDF/114>>. Acesso em 25 nov.2013.

EASWARAN, G. ÜSTER, H. A. closed-loop supllly chain network design problem with integrated forward and reverse channel decisions. **IIE Transactions**, Nova York, v. 42, n. 11, p. 779-792. 2010. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/0740817X.2010.504689>>. Acesso em: 12 fev. 2014

EFENDIGIL, T.; ÖNÜT S.; KONGAR, E. A holistic approach for selecting a third-party reverse logistics provider in the presence of vagueness. **Computers & Industrial Engineering**, Nova York, v. 54, n. 2, 2008, p. 269-287.

ESTRADA, D. **O segredo do modelo nórdico**: os riscos do lixo eletrônico. [S.l.: s.n.], 2005. Terramérica: meio ambiente e desenvolvimento: (IPS). Disponível em: <<http://www.ips.org/ipsbrasil.net/nota.php?idnews=25>>. Acesso em: 15 jun.2010.

ENSSLIN L.; GIFFHORN E.; ENSSLIN S. R; PETRI, S. M.; VIANNA, W. B. Avaliação do desempenho de empresas terceirizadas com o uso da metodologia multicritério de apoio à decisão – construtivista. **Pesquisa Operacional**, São Paulo, v. 30, n. 1, p.125-152, 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pope/v30n1/07.pdf>>. Acessado em: 7 fev.2017.

FLEISCHMANN, M.; BLOEMHOF-RUWAARD, J. M.; DEKKER, R.; van der LAAN, E. A.; van NUNEN, J.A.E.E.; Van WASSENHOVE, L. N. Quantitative models for reverse logistics: a review. **European Journal of Operational Research**, North-Holland, v. 103, n.1, p.1-17, 1997

FLEISCHMANN, M. **Quantitative models for reverse logistics**. New York: Springer-Verlag berin Heidelberg, 2001. 435 p.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE- FEAM. **Diagnóstico da geração de resíduos eletroeletrônicos no estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Governo de Minas gerais, 2009. 85 p.

FUZZY logic fundamentals. [S.l.]: Pearson, 2001. p. 61-103. Disponível em:<<http://wenku.baidu.com>>. Acesso em: 10 jun. 2012.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010. 176 p.

GOMIDE, F.A.C.; GUDWIN, R. R. Modelagem, controle e sistemas e lógica *Fuzzy*. **SBA Controle & Automação**, Heidelberg, v. 4, n. 3, p. 97-115, set- out. 1994.

GUEDES, C. Ajudando na implantação de um sistema de gestão ambiental. **techoje-meio ambiente**. Belo Horizonte: IETEC, 2004. 3 p.

GUERRA, L.; MURINO, T., ROMANO E. Reverse logistics for electrical and electronic equipment: a modular simulation model. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCE AND SIMULATION IN ENGINEERING- WSEAS, 8, 2009, Genova. **Procededings...** Genova: [s.n]: 2009. v. 90, p. 307-312.

GUIQIN, W.; LI, Q; GOUXUE, L.; LIJUN, C. L. Landfill site selection using spatial information technologies and AHP: a case study in Beijing, China. **Journal of Enviromental Mangement**, v. 90, n. 8, p. 2414-2421, 2009.

GRECHUS E.; JOHNSON S.; McDONNELL D. Improving Environmental Performance Trough Reverses Logistics at IBM. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRONICS AND THE ENVIRONMENTAL– IEEE, 2001, Denver. **Proceedings...** Denver: [s.n.], 2001. p. 236-240.

HANAFI, J.; KARA, S.; KAEBERNICK, H. Reverse logistics strategies for end-of-life products. **The International Journal of Logistics Management**, Bingley, v. 19, n. 3, p. 367-388. 2008. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=1752682&show=abstract>>. Acesso em: 14 jan. 2014.

HANINE, M.; BOUTKHOUM, O., TIKNIOUINE, A.; AGOUTI T. **Comparison of fuzzy AHP and fuzzy TODIM methods for landfill location selection**. [S.l.]: SpringerPlus, 2016. v. 5. Disponível em: <<https://springerplus.springeropen.com/articles/10.1186/s40064-016-2131-7>>. Acessado em: 25 fev. 2017.

HARRINGTON, H. J.; KNIGHT, A. **A implantação da ISO 14000: como atualizar o SGA com eficácia**. São Paulo: Atlas, 2001. 365 p.

HO, W.; HE, T.; LEE, C. K. M.; EMROUZNEJAD, A. Strategic logistics outsourcing: an integrated QFD and fuzzy AHP approach. **Expert Systems with Applications**, Kidlington, v. 39, p. 10841–10850, 2012. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/William_Ho4/publication/257404222_Strategic_logistics_outsourcing_An_integrated_QFD_and_fuzzy_AHP_approach/links/54a7adf50cf267bdb90a1b4b/Strategic-logistics-outsourcing-An-integrated-QFD-and-fuzzy-AHP-approach.pdf>. Acessado em: 16 abr 2017.

HÖHLE, U.; RODABAUGH, S. E. **Mathematics of Fuzzy sets: logic, topology, and measure theory**. Berkeley: Springer Science & Business Media, 1999. 716 p.

HOLMBLAD L. P; OSTERGAARD J. J. Control of cement kiln. In: GUPTA M. M, SANCHEZ E. **Fuzzy information and decision processes**. North Holland: Publishing Company, 1982. p. 389-399.

HONG, R. J.; WANG, G. F.; GUO, R. Z., CHENG X.; LIU Q.; ZHANG, P. J.; QIAN, G. R. Life cycle assessment of BMT-based integrated municipal solid waste management: case study in Pudong, China. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 49, n. 2, p. 129-146. 2006.

HOUAISS, A. **Dicionário eletrônico Houaiss da língua portuguesa**. Rio de Janeiro: Objetiva, 2001. 1 CD-ROM.

INDERFURTH, K.; LAAN, V.D.E.; TEUNTER, R.H. How to set the holding cost rates in average cost inventory models with reverse logistics? **International Journal of Management Science**, Ghaziabad, v. 28. n. 4. p. 409-415, 2000

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Pesquisa nacional de saneamento básico 2010**: atlas de saneamento 2011. Rio de Janeiro: [s.n.], 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 10 maio 2011.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA. Diagnóstico dos resíduos sólidos de logística reversa obrigatória: relatório de pesquisa. Tmasui **Oxford Journal of Mathematical Sciences**, Brasília, DF, v. 21, p. 243-268, 2005. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X11005737?via%3Dihub>. Acessado em: 11 set. 2016.

ISHIZAKA, K., TANAKA, M. Resolving public conflict in site selection process –risk communication approach. **Waste Management**, Kidlington, v. 23, p.385–396, 2003.

JACOBI, P. Educação ambiental, cidadania e sustentabilidade. **Cadernos de Pesquisa**, São Paulo, n. 118, p. 189-205. mar. 2003

JAHRE, M. Household waste collection as a reverse channel: a theoretical perspective. **International Journal of Physical Distribution and Logistics Management**, Bingley, v. 25, n. 2, p. 39-55, 1994

JANA, B.; ROY, T.K. Multi-objective Fuzzy linear programming and its application in transportation model. **Journal of Mathematical Sciences**, New York, v. 21, n. 2, p. 243-268, 2005.

JANSE, B.; SCHUUR, P.; BRITO, M.P. A reverse logistics diagnostic tool: the case of the consumer electronics industry. **International Journal Adv. Manufacturing Technology**, v. 47, p. 495-513, 2010.

JASIEWICZ, J., Di LEO, M. Application of Grass Fuzzy modeling system: estimations of prone risk in arno river area. In: CONGRESSO GEOINFORMATICS, 2011. Prague. **Congresso...** Prague: [s.n.], 2011. Disponível em: <<http://grass.itc.it>>. Acessado em: 27 set. 2016.

JAYARAMAN, V.; GUIDE Jr., V.D.R.; SRIVASTAVA, R. A Closed-Loop Logistics Model for Remanufacturing. **Journal of the Operational Research Society**, Heidelberg, v. 50, n. 5, p. 497-508. 1999.

JENNINGS, A., SCHOLAR, R.L. Hazardous waste disposal network analysis. **Journal of the Environmental Engineering**, Philadelphia, ASCE, v. 110, n. 2, p. 325–342, 1984.

KABOLI A; ARYANEZHAD MB; SHAHANAGHI K; NIROOMAND J. A new method for plant location selection problem: a fuzzy AHP approach. IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM, MAN AND CYBERNETICS, 2007, Montreal. **Proceedings...** Montreal: [s.n.], 2007. p. 582- 586.

KAHRAMAN, C; CEBECI, U, ULUKAN, Z. Multi-criteria supplier selection using fuzzy AHP. **Logistics Information management**, Bingley, v. 16, n. 6, p. 382-394, 2003

KAO, J.J.; LIN, H.J.; CHEN, W.Y. Network geographic information system for landfill siting. **Waste Management**, Kidlington, v. 15, n. 3, p. 239–253, 1997

KICKERT, W. J. M. **Fuzzy theories on decision-making**: a critical review. London: Martinus Nijhoff Social Sciences Division, 1978. 182 p.

KILINCCI, O. ONAL, S. A. Fuzzy AHP approach for supplier selection in a washing machine company. **Expert Systems with Applications**, Kidlington, v. 38, n. 8, p. 9656-9664, 2011. Disponível em: <<http://www.modirbartar.com/Content/Asn/fd66062c-4ad2-4a22-99e7-84f794876d2c/library/En/Fuzzy-AHP-approach-for-supplier-selection-in-a-washing-machine-company.pdf>> Acessado em: 18 jun.2016.

KLIR, G.J.; YUAN, B. **Fuzzy sets and fuzzy logic**: theory and applications. New Jersey: Prentice Hall, 1995. 574 p. Disponível em: <<http://digilib.uin-suka.ac.id/7049/1/FUZZY%20SETS%20AND%20FUZZY%20LOGIC%20Theory%20and%20Applications%20-%20GEORGE%20J.%20KLIR%20%2C%20BO%20YUAN.pdf>>. Acessado em: 2 out.2016.

KOPICKY, R.J.; BERG, M. J.; LEGG, L. L.; DASAPPA, V.; MAGGIONI, C. **Reuso and recycling-reverse**: logistics opportunities. Oak Brook: Council of Logistics Management. 1993. 324p.

KRIKKE, H. **Recovery strategies and reverse logistics network design**. Holanda: Institute for Business Engineering and Technology Application- BETA, 1998. 15 p.

KRIKKE, H. R.; VAN HARTEN, A.; SCHUUR, P. C. Business case roteb: recovery strategies for monitors. **Computers & Industrial Engineering**, Kidlington, v.36, n. 4, p.739-757. 1999.

LACHTERMACHER, G. Pesquisa operacional na tomada de decisão. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009. 223 p.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. de A. **Fundamentos de metodologia científica**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2007. 368 p.

LAU, K.H.; WANG, Y. Reverse logistics in the electronic industry of China: a case study. **Supply Chain Management: Um Jornal Internacional**, Bingley, v. 14, n. 6, p. 447-465, 2009.

LEE, J. E.; GEN, M. RHEE, K.G. Network model and optimization of reverse logistics by hybrid genetic algorithm. **Computers & Industrial Engineering**, Nova York, v. 56, n. 3, p. 951-964, 2009.

LEE, E.S.; LI, R.J. Fuzzy multiple objective programming and compromise programming with Pareto optimum. **Fuzzy sets e Systems**, North-Holland, v. 53, n. 2, p. 275-288, 1993. Disponível em: <http://ac-els-cdn-com.ez87.periodicos.capes.gov.br/0165011493903993/1-s2.0-0165011493903993-main.pdf?_tid=c1db0d06-4d19-11e7-b696-00000aacb35e&acdnat=1497016048_279ec5c3f432e8a2fdcea3ace422559d>. Acessado em: 15 jun.2016.

LEITE, P. R. **Logística reversa**: meio ambiente e competitividade. São Paulo: Prentice Hall. 2009. 256 p.

LEITE, P. R.; LAVEZ, N.; SOUZA V. M. Fatores da logística reversa que influem no reaproveitamento do lixo eletrônico: um estudo no setor de informática. In: SIMPÓSIO DE ADMINISTRAÇÃO DA PRODUÇÃO, LOGÍSTICA E OPERAÇÕES INTERNACIONAIS-SIMPOI, 12., 2009, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Escola de Administração de Empresas de São Paulo da Fundação Getulio Vargas, 2009, 16 p.

LI, S. WANG, N.; HE, Z.; CHE, A.; MA, Y. Design of a multiobjective reverse logistics network considering the cost and service sevel. **Mathematical Problems in Engineering**, Nova York, v. 2, p. 21, 2012. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/mpe/2012/928620/>>. Acessado em: 18 ago. 2016.

LI, X; DI, L.; HAN, W.; ZHAO, P.; DADI, U. Sharing geoscience algorithms in a web servisse-oriented environment (GRASS GIS example). **Computers & Geosciences**, Kidlington: Pergamon, v. 36, p. 1060-1068, 2010.

LI, Y. HUANG, G. Modeling municipal solid waste management system under uncertainty. **Journal of the Air & Waste Management Association**, Pittsburgh, v. 60, p. 439- 453. 2010. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.3155/1047-3289.60.4.439>>. Acessado em: 2 fev. 2015.

LIECKENS, K.; VANDAELE, N. Multi-level reverse logistics network design under uncertainty. **International Journal of Production Research**, Abingdon, v. 50, p. 23- 40, 2011.

LIMA, J. D. **Gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil**: engenharia sanitária e ambiental. Rio de Janeiro: ABES, 2002. 22 p.

LIN, H. Y.; HSU, P. Y.; SHEEN, G. J. A fuzzy-based decision making procedure for data warehouse system selection. **Expert System Applications**, Tonbridge, v. 32, n. 3, p. 939-953, 2007. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/58d8/19116d1a528b0ed62cbb68e7257db5953b2a.pdf>>. Acessado em: 10 maio 2017.

LING, Z.; ZHENGXIAO, W.; XIAONHONG, P; TIANYANG, D. Optimization model for remanufacturing logistics network with fuzzy parameters. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MEASURING TECHNOLOGY AND MACHATRONICS AUTOMATION- IEEE, 10., 2010. Washington. **Proceedings...**, Washington: IEEE Computer Society, 2010. p. 849-852.

LIVA, P.B.G; PONTELO, V.S.L; OLIVEIRA, W.S. Gestão e tecnologia industrial. **Revista Techoje- IETEC**, Belo Horizonte, n.p., 2003. Disponível em: <http://www.techoje.com.br/site/techoje/categoria/detalhe_artigo/301>. Acesso em: 23 jan. 2012.

LORA, E. E. S. **Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte**. Brasília: ANEEL, 2000. 503 p.

LOUWERS, D.; KIP, B. J.; PETERS, E.; SOUREN, F.; FLAPPER, S. D. P. A facility allocation model for reusing carpet materials. **Computer & Industrial Engineering**, Kidlington, v. 36, n. 4, p. 855-869. 1999.

MALHOTRA, N. K. **Pesquisa de marketing**: uma orientação aplicada. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 719 p.

MAMDANI E. H.; ASSILION S. An experiment in linguistic Synthesis with a fuzzy logic controller. **International Journal Man-Machine Studies**, London, v. 7, n. 1, p. 1-13, 1975. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020737375800022>>. Acesso em: 7 jan. 2017

MAHINI, A. S.; GHOLAMALIFARD, M. Siting MSW landfills with a weighted linear combination methodology in a GIS environment. **Science Technology**, v. 3, n. 4, p. 435- 445, 2006. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/BF03325953>>. Acessado em: 25 fev. 2017.

MARQUES, C. S. A.; VASCONCELOS, I. L., AGUIAR, E. M. de. A Logística reversa e o gerenciamento de resíduos sólidos. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 6., 2002, Gramado. **Resumos...**: Porto Alegre: ABES, 2002.

MARQUES, C. S. A.; AGUIAR, E. M. de. **Logística reversa**: conceitos e perspectivas. Bacia Hidrográfica: diversas abordagens em pesquisa. São Carlos: Rima, 2004a, v. 3, p. 287-303.

MARQUES, C. S. A.; AGUIAR, E. M. de. Reverse logistics: an important tool for the solid waste management. In: GLOBAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE PRODUCT DEVELOPMENT AND LIFE CYCLE ENGINEERING, 1., 2004, Berlin. **Conference...** Berlin: Uni-edition, 2004b. v. 1, n.1, p.149 – 154..

MATHWORKS. **Documentation**. [S.1, s.n: 200-] Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/fuzzy/fuzzy-inference-process.html?requestedDomain=www.mathworks.com#FP347>>. Acessado em: 20 maio 2017.

MATOS, D. A. de. **Tomada de decisão em redes logísticas de reciclagem de materiais através da Dinâmica de sistemas**. 2012. 195 f. Tese (Doutorado)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

MEADE, L.; SARKIS, J; PRESLEY, A. The theory and practice of reverse logistics. **International Journal of Logistics Systems and Management**, Genebra, v. 3, n. 1, p. 56– 84, 2007. Disponível em: <<http://www.inderscience.com/info/inarticle.php?artid=12070>>. Acessado em: 25 out. 2015.

METCALFE, G. **Fundamentals of Fuzzy logics**. Vienna: University of Technology, 2011. Disponível em: <<http://logic.at/tbilisi05/Metcalfenotes.pdf>>. Acesso em: 5 abr. 2013.

MIGUEZ, C. E. **Logística reversa como solução para o problema do lixo eletrônico**: benefícios ambientais e financeiros. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2010. 112 p.

MIN, H; KO, H. J. The dynamic design of a reverse logistics network from the perspective of third-party logistics service providers. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 113, n. 1, p. 176- 192. 2008. Disponível em:

<http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6VF8-4P8B0RH-D&_user=604493&_coverDate=05%2F31%2F2008&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1583173887&_rerunOrigin=scholar.google&_acct=C000059656&_version=1&_urlVersion=0&_userid=604493&md5=357fe589292f35f360a6ea58fbad8d98&searchtype=a>. Acesso em: 8 dez. 2013

MIN, H; KO, H-J; KO C.S. A genetic algorithm approach to developing the multi-echelon reverse logistics network for product returns. **Omega**, Kidlington, v. 34, n. 1, p. 56-69. 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030504830400115X>>. Acesso em: 10 out. 2013.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTE URBANO. **Planos estaduais de resíduos sólidos**: orientações gerais. Brasília, DF: Ministério do meio ambiente, 2011. 30 p.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **Sistema de informações geográficas**. Brasília, DF: [s.n]. Banco de Informações e Mapas de Transportes- BIT. Disponível em: <<http://www2.transportes.gov.br/bit/01-inicial/sig.html>>. Acesso em: 10 fev. 2014.

MINUSSI, C. R. **Lógica nebulosa (Fuzzy Logic)**: introdução. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista – UNESP, 2009. 114 p. Apostila.

MIRANDA, J. I. **Fundamentos de sistemas de informações geográficas**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2010. 425 p.

MOHAMED H.; OMAR B.; ABDESSADEK T.; TARIK A. An application of OLAP/GIS-Fuzzy AHP-TOPSIS methodology for decision making: location selection for landfill of industrial wastes as a case study. **Journal of Civil Engineering**, Taiwan, v. 21, n. 6, p. 2024-2084, 2016. Disponível em: < <https://link.springer.com/article/10.1007/s12205-016-0114-4>>. Acessado em: 20 jun. 2017

MOREIRA, M. S. **Estratégia e implantação do sistema de gestão ambiental**: modelo ISO 14000. Belo Horizonte: Desenvolvimento Gerencial, 2001. 286 p.

NANNI A.S; DESCOVI FILHO, L; VIRTUOSO, M. A; MONTENEGRO, D; WILLRICH, G; MACHADO, P. H; SPERB, R; DANTAS, G. S; CALAZANS, Y. **Quantum GIS**: guia do usuário, versão 2.0 Valmiera: Comunidade QGIS, 2014. Disponível em: <<http://qgisbrasil.org>. 283p., il>. Acesso em: 5 abr. 2014.

ÖZDAĞOĞLU, A.; ÖZDAĞOĞLU, G. Comparison of AHP and Fuzzy AHP for the multi-criteria decision making processes with linguistic evaluations. **Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**, v. 1, n. 6, p. 65- 85, 2007. Disponível em: <<http://www.ticaret.edu.tr/uploads/Kutuphane/dergi/f11/M00178.pdf>>. Acessado em: 14 jun. 2017.

OLIVEIRA G. C. de; CAMARGO, S. A. F. O paradoxo do tratamento dos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos. In: CONGRESSO DO CONSELHO NACIONAL DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM DIREITO- CONPEDI, 13., 2009, São Paulo. **Anais...**, São Paulo: São Paulo, [s.n.], 2009. p. 2731-2749.

OLIVEIRA, R. L. **Logística reversa**: a utilização de um sistema de informações geográficas na coleta seletiva de materiais recicláveis. 2011. 151 f. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011.

OMAR, A.S.; WAWERU, M.; RIMIRU, R. Application of Fuzzy logic in qualitative performance measurement of supply chain management. **International Journal Information and Communication Technology Research**, v. 5, n. 6, p. 13, 2015. Disponível em: <http://esjournals.org/journaloftechnology/archive/vol5no6/vol5no6_1.pdf>. Acessado em: 13 maio 2017.

PAL, S. K.; MITRA, S. **Neuro-Fuzzy pattern recognition**: methods in soft computing. Wiley: Universidade de Michigan, 1999. 408 p.

PATI, R. K.; VRAT, P.; KUMAR, P. Economic analysis of paper recycling vis-à-vis wood as raw material. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 103, n. 2, p. 489- 508. 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527306000077>>. Acesso em: 15 nov.2013.

PEDRYCZ, W. **Fuzzy sets engineering**. Florida: CRC Press, 1995. 352 p.

PEIRCE, J. J.; DAVIDSON, G.M. Linear programming in hazardous waste management. **Journal of the Environmental Engineering Division**, Reston, v. 108, n. 5, p. 1014–1026, 1982.

PEIXOTO, K.; CAMPOS, V.B. G.; D'AGOSTO, M. A. **Localização de equipamentos para coleta seletiva de lixo reciclável em área urbana**. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia- 2007. Notas de Aula Disponível em: [http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/vania/pubs/\(4\)coletaseletiva.pdf](http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/vania/pubs/(4)coletaseletiva.pdf). Acessado em: 24 mar. 2016.

PEREIRA, A. L.; TADEU, H. F. B.; SILVA, J. T. M.; BOECHAT, C. B.; CAMPOS, M. S. **Logística reversa e sustentabilidade**. São Paulo: Cengage Learning. 2011. 180 p.

PHILLIPI JUNIOR. A; ROMÉRO, M. A.; BRUNA, G. C. **Curso de gestão ambiental**. Barueri: Manole, 2004. 1045 p.

PINTO, I. **Introdução aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG)**. [S.l.]: Instituto de Investigação Científica Tropical, 2009. Disponível em: <http://www2.iict.pt/archive/doc/georrefIntroducaoSIG_InesPinto.pdf>. Acessado em: 29 ago 2016.

PLANO DE SANEAMENTO BÁSICO DO MUNICÍPIO DE ILHA SOLTEIRA, SP. **Diagnóstico**: resíduos sólidos- relatório final. Ilha Solteira: Prefeitura Municipal de Ilha Solteira, 2013.

PORTUGAL, S. M.; DANTÉS, G. B. Diagnóstico da geração de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE). **Revista de Resíduos em Referência**, Belo Horizonte, p. 16-21, 2010. Disponível em: <<http://www.cmrr.mg.gov.br/media/uploads/2012/01/24/Revista%20Tecnica%201%20Edicao.pdf>>. Acesso em: 29 ago. 2014.

POCHAMPALLY, K.K., GUPTA, S.M. A multiphase Fuzzy logic approach to strategic planning of a reverse supply chain network. **IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing**, Piscataway, v. 31, n. 1, p. 72- 82, 2008. Disponível em: <<https://repository.library.northeastern.edu/files/neu:330820/fulltext.pdf>>. Acessado em: 12 jul.2015.

POHLEN, T.; FARRIS, M. Reverse logistics in plastics recycling. **International Journal of Physical Distribution and Logistics Management**, Bingley, v. 22, n. 7, p. 34-47, 1992.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE- PNUMA. **Sustainable innovation and technology transfer industrial sector studies: recycling from e-waste to resources**. Nairobi: [s.n.], 2010. Disponível em: <http://www.unep.org/PDF/PressReleases/E-Waste_publication_screen_FINALVERSION-sml.pdf>. Acesso em 20 jun.2013.

PRODANOV, C. C; FREITAS, E.C. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Universidade Feevale, 2013. Disponível em: <<http://www.feevale.br/Comum/midias/8807f05a-14d0-4d5b-b1ad-1538f3aef538/E-book%20Metodologia%20do%20Trabalho%20Cientifico.pdf>>. Acessado em: 20 maio 2016.

QIN, Z; JI, X. Logistics network design for product recovery in *Fuzzy* environment. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 202, n. 2, p. 479- 490, 2010. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6VCT-4WF4J3B-5&_user=604493&_coverDate=04%2F16%2F2010&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1583754691&_rerunOrigin=google&_acct=C000059656&_version=1&_urlVersion=0&_userid=604493&md5=3869e53227ec93f4e32ab5353639649c&searchtype=a>. Acesso em: 10 fev. 2014

REALFF, M. J.; AMMONS, J. C.; NEWTON, D. J. *Carpet recycling: determining the reverse production system design*. **Journal of Polymer-Plastics. Technology & Engineering**, Nova Iorque, v. 38, n. 3, p. 547- 567. 1999. Disponível em: <http://pdfserve.informaworld.com/74968_793539726_792436714.pdf>. Acesso em: 13 jan.2014.

REVLOG: THE EUROPEAN WORKING GROUP ON REVERSE LOGISTICS. **Revlog introduction**. Dornach: Reverse Logistic Group- RLG, 2001 Disponível em: <<http://www.fbk.eur.nl/OZ/REVLOG/Introduction.htm>. 2001>. Acesso em: 12 mar. 2012.

REZAEI, J. A systematic review of multi-criteria decision-making applications in reverse logistics. **Transportation Research Procedia**, Amsterdam v. 10, [s.n], p. 766– 776, 2015. Disponível em: <http://ac.els-cdn.com/S2352146515002173/1-s2.0-S2352146515002173-main.pdf?_tid=2c6c78da-724a-11e7-883d-00000aabb0f26&acdnat=1501105036_04f66b9bec00a64fde064a29a9b9de1a>. Acessado em 5 maio 2016.

RICHARDSON, R. J. **Pesquisa social: métodos e técnicas**. São Paulo: Atlas, 1985. 334 p.

ROGERS, D.; TIBBEN-LEMBKE, R. S. **Going backwards: reverse logistics trends and pratics**. Reno, Universidade de Nevada, 1999.

ROJAS, R. **Neural networks: Fuzzy logic**. Berlin: Springer-Verlag, 1996. p. 289- 310

RONGJUN LI, E.; STANLY L. *Fuzzy multiple objective programming and compromise programming with pareto optimum*. **Fuzzy Sets and Systems**, Amsterdam, v. 53, p. 275-288, 1993.

SAATY, T. L. **Relative measurement and its generalization in decision making: why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors - the analytic hierarchy/network process**. Madrid: Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, 2008. (Series A, Mathematics). Disponível em: <<http://www.rac.es/ficheros/doc/00576.PDF>>. Acessado em: 25 abr. 2017.

SANTOS, R. F.; MARINS, F. A. S. Integrated model for reverse logistics management of electronic products and components. **Procedia Computer Science**, Amsterdam, v. 55, p. 575– 585, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050915015227>>. Acessado em: 16 maio 2017.

SANTOS M., R. **Disciplina de banco de dados III**. Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, 2012. Disponível em: <<http://www.inf.ufsc.br/~ronaldo/ine5342/bdg.ppt>>. Acessado em: 25 maio 2016.

SCHALCH, V.; LEITE, W. C. A. Resíduos sólidos (lixo) e meio ambiente. In: CASTELLANO, E. G.; CHAUDHRY, F. H. **Desenvolvimento sustentado: problemas e estratégias**. São Carlos: EESC-USP, 2000. 22p.

SENER, B.; SUZEN; M. L.; DOYURAN, V. Landfill site selection by using geographic information systems. **Environmental Geology**, Heidelberg, v. 49, n. 3, p. 376–388. 2006. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00254-005-0075-2>>. Acessado em: 17 abr. 2016.

SENTHIL S.; SRIRANGACHARYULU, B.; RAMESH, A. A robust hybrid multi-criteria decision making methodology for contractor evaluation and selection in third-party reverse logistics. **Expert Systems with Applications**, Kidlington, v. 41, n. 1, p. 50-58, 2014. Disponível em: <http://ac.els-cdn.com/S2352146515002173/1-s2.0-S2352146515002173-main.pdf?_tid=2c6c78da-724a-11e7-883d-00000aabb0f26&acdnat=1501105036_04f66b9bec00a64fde064a29a9b9de1a>. Acessado em: 5 jun. 2016.

SHIH, L. Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in Taiwan. **Resources, Conservation and recycling**, Amsterdam, v. 32, n. 1, p. 55-72, 2001.

SIDDIQUI, M.; EVERETT, J.M.; VIEUX, B.E. Landfill siting using geographical information systems: a demonstration. **Journal Environmental Engineering**, Reston, v. 122, n. 6, p. 515–523. 1996. Disponível em: <[http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1996\)122%3A6\(515\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9372(1996)122%3A6(515))>. Acessado em: 23 jun.2015.

SILVA, E. O. Extensões espaciais em MySQL. **SQLMagazine**, [200-]. Disponível em: <<http://www.devmedia.com.br/artigo-sql-magazine-14-extensoes-espaciais-em-mysql/5683>>. Acessado em: 25 jul. 2015.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO- SINIS. **Diagnósticos: resíduos sólidos**. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2011. Disponível em: <http://www.snis.gov.br>. Acesso em: 15 out. 2013.

SLIJKHUIS, C. **Reciclagem de embalagens de transporte**. [S.l.: s.n., 200-]. Disponível em: <<http://www.guiadelogistica.com.br/ARTIGO19.htm>>. Acessado em: ago. 2012.

SOUZA, M. P. **Instrumentos de gestão ambiental: fundamentos e prática**. São Carlos: Riani Costa, 2000. 112 p.

STEVEN, M. **Networks in reverse logistics: supply chain and reverse logistics**. Berlin: Springer-Verlag, 2004. p. 163-180.

STOCK, J. R. **Development and implementation of reverse logistics programs**. Oaks Brook: Council of Logistics Management Books, 1998. 247 p.

TIBBEN-LEMBKE, R. S. Life after death: reverse logistics and the product life cycle. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, Bingley, v. 32, n. 3, p. 223-244, 2002.

THIERRY, M.; SALOMON, M.; NUNEN, J. V.; WASSENHOVE, L. V. Strategic issues in product recovery management. **California Management Review**, Thousand Oaks, v. 37, n. 2, p. 114-135, 1995.

TORRE, P. L. G.; DÍAZ, B. A.; TORRES, A. R. Some comparative factors regarding recycling collection systems in regions of the USA and Europe. **Journal of Environmental Management**, London, v. 69, n. 2, p. 129-138, 2003 Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479703001099>>. Acessado em 24 mar.2016.

TSOUKALAS, L.H.; UHRING, R. **Fuzzy and neural approaches in engineering**. Wiley: Universidade de Michigan, 1997. 587 p.

TUZEN, M. **Fuzzy logic**. Sarajevo: Faculty of Economy Burch University Sarajevo Bosnia and Herzegovina. 2011. Disponível em: <https://www.academia.edu/5542014/FUZZY_LOGIC>. Acesso em: 5 fev. 2014.

- TUZKAYA, G.; GÜLSÜN, B. Evaluating centralized return centers in a reverse logistics network: a integrated *Fuzzy* multi-criteria decision approach. **International Journal of Enviromental Science and Technology**, v. 5, n. 3, p. 339-352. 2008. Disponível em: <http://www.ceers.org/ijest/issues/abstract_result.asp?ID=503007>. Acesso em: 8 nov. 2013.
- UNIÃO EUROPEIA. DIRETIVA 2002/96/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO, de 27 de janeiro de 2003. Relativa aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE). **Jornal Oficial da União Europeia**, p. 24-38, 2003.
- VALLE, C. E. **Como se adaptar para as normas ISO 14000**: qualidade ambiental: o desafio de ser competitivo protegendo o meio ambiente. São Paulo: Pioneira Administração de negócios, ABIMAQ/SINDMAQ, 1996.
- VARGAS, R. V. Utilizando a programação multicritério (Analytic Hierarchy Process AHP) para selecionar e priorizar projetos na gestão de portfólio. In: PMI GLOBAL CONGRESS, 1., 2010, Washington. **Anais...** Washington: [s.n], 2010. 22 p. Disponível em: <<http://www.leansixsigma.com.br/acervo/2215922.pdf>>. Acessado em: 12 mai. 2015.
- WANG, G.; QIN, L.; LI, G.; CHEN, L. Landfill site selection using spatial information technologies and AHP: a case study in Beijing, China. **Journal Environmental Management**, London, v. 90, n. 8, p. 2414- 2421, 2009. Disponível em: <https://www.academia.edu/1903891/Landfill_site_selection_using_spatial_information_technologies_and_AHP_A_case_study_in_Beijing_China>. Acessado em: 3 mar.2017.
- WANG, Z.; YIN, J.; MA, W. A *Fuzzy* modeling and solution algorithm for optimization on e-waste reverse logistics. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINE LEARNING AND CYBERNETICS- IEEE, 7. 2008, Kunming, **Proceedings...** Kunming: IEEE, 2008. v. 1, p. 472-478.
- WOLFER, S.; SANDER, H.; GOGOLL, F. **Reverse logistics for waste electrical and eletronic equipament (WEEE) in China**: application of linear programming to eco-innovation in industry. Germany: Institute of Global Business and Society – Cologne University of Applied Sciences. 2011. 31p. (Globus Working Paper).
- YESILNACAR, M.I.; CETIN, H. Site selection for hazardous wastes: a case study from the GAP area, Turkey. **Engeneering Geology**, v. 81, n. 4, p. 371– 388. 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795205001602?via%3Dihub>>. Acessado em: 21 mar. 2016.
- ZAMBON, K. L.; CARNEIRO, A. A. F. M.; SILVA, A. N. R.; NEGRI, J. C. Análise de decisão multicritério na localização de usinas termoeletricas utilizando SIG. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 2, p. 183-199, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-74382005000200002>. Acessado em: 20 jun. 2017.
- ZADEH, L. A. *Fuzzy sets*. **Information and Control**, New York, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965.
- ZANTA, V. M; FERREIRA, C. F. A. **Gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos**. Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, 2003. Disponível em: <<http://www.ens.ufsc.br/labs/Livro%20Prosab/cap01.doc>>. Acesso em: 20 out. 2010.

ZIS, T. **MIDgeo**: uma ferramenta de inferência nebulosa para tratamento de geoinformação. Itajaí: Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar, Universidade do Vale do Itajaí, 2012. 82 p.

APÊNDICE A – DADOS PARA CÁLCULO DO CUSTO TOTAL DA REDE
PROPOSTA

Tabela 20 – Planilha de Dados para custos

			p(Km)	p(m)					p(hab)			
	CUSTO DE TRANSPORTE (R\$)	CTT	16,00	0,016			VOLUME PRODUZID	VPP	2,6			
			Distância (m)									
			PONTO DE ENTREGA VOLUNTÁRIA							CENTRO DE TRATAMENTO		
			PEV1	PEV2	PEV3	PEV4	PEV5	PEV6	PEV7	CTRAT0	CTRAT1	CTRAT2
	CENTRO DE TRIAGEM	CTRIAG	4890	8994	4062	4856	3833	4251	0	50	13606	4190
BAIROS	ZONA SUL	B1	792	126	1643	1803	2614	2583	4284	4241	8002	2514
	CENTRO	B2	119	907	862	1233	1848	2446	3625	3579	8702	2326
	ZONA NORTE	B3	811	1711	73	1005	1086	2561	3011	2962	9435	2399
	JD. AEROPORTO	B4	1424	2130	903	379	1479	3434	3505	3455	9380	3272
	RES. NOVA ILHA	B5	1499	1817	1485	514	2311	3799	4336	4286	8537	3664
	PORTAL DO SOL	B6	1670	766	2497	2423	3489	3227	5165	5122	7120	3196
	JD. NOVO HORIZONTE	B7	1793	2711	999	1820	59	2594	2013	1963	10504	2405
	VILA PORTAL DO BOSQUE	B8	2080	3000	1261	1976	262	2830	1889	1838	10764	2640
	CJ. HAB. ALFREDO SOARES CAVALCANTE	B9	2261	3176	1476	2241	463	2772	1618	1568	10981	2582
	TORRE DE TV	B10	3371	4235	2719	3589	1784	2907	272	226	12117	2744
	RECANTO DAS ÁGUAS	B11	4257	5148	3528	4271	2525	3882	980	994	13011	3724
	JD. MORADA DO SOL	B12	3705	4593	2987	3767	1995	3400	608	596	12460	3235
	PORTAL DA PRAIA	B13	4239	4995	3760	4737	2966	2971	1068	1112	12813	2870
	ALAMEDA DOS PESCADORES	B14	3327	3400	3668	4595	3830	1177	3825	3816	10104	1365
			PONTO DE ENTREGA VOLUNTÁRIA							CENTRO DE TRATAMENTO		
			PEV1	PEV2	PEV3	PEV4	PEV5	PEV6	CTRIAG	CTRAT0	CTRAT1	CTRAT2
		IPEV	1	1	1	1	1	1	1			
	CUSTO FIXO (R\$)	CFIXO	6000	6000	6000	6000	6000	6000	200868,75	252756	252756	252756
	POPULAÇÃO ATENDIDA (hab)	HAB	4295	6435	9712	4226	621	2055	2910	26344	26344	26344
		VPP	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
	ÁREA DE ABRANGENCIA (m2)	AA	420966	1971102	1908369	1855963	260896	2935632	280028			
	TEM CENTRO DE TRIAGEM?	QCTRIAG	0	0	0	0	0	0	1			
	TEM CENTRO DE TRATAMENTO?	QCTRAT								0	1	0

Fonte: Elaborado pela autora

APÊNDICE B – BASE DE DADOS REEE

Este projeto denominado “C_REEE” foi armazenado na pasta BD_REEE que contém o banco de dados e todos os arquivos separados em pastas conforme padrão técnico do LTP/UNESP.

Segue o link para download da base de dados

<https://www.dropbox.com/sh/g7872q6nnx1t9zn/AADZQ0IGu7x10WOPNf3vLdwja?dl=0>