UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

CENTRO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

FABÍOLA RENATA ALVES ROBERTO

MAXIMIZAÇÃO DO ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE E DA PRODUÇÃO TOTAL DE AGROECOSSISTEMAS

JOÃO PESSOA-PB

2020

FABÍOLA RENATA ALVES ROBERTO

MAXIMIZAÇÃO DO ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE E DA PRODUÇÃO TOTAL DE AGROECOSSISTEMAS

Dissertação a ser apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal da Paraíba, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Quirino do Nascimento

JOÃO PESSOA-PB
2020

R642m Roberto, Fabiola Renata Alves.
Maximização do índice de sustentabilidade e da produção total de agroecossistemas / Fabiola Renata Alves Roberto. - João Pessoa, 2020.
74 f. : il.

Orientação: Roberto Quirino Do Nascimento.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Engenharia - planejamento da produção. 2. Sustentabilidade. 3. Pesquisa operacional. 4. Programação geométrica. I. Nascimento, Roberto Quirino do. II. Título.

UFPB/BC CDU 658.5(043)

MAXIMIZAÇÃO DO ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE E DA PRODUÇÃO TOTAL DE AGROECOSSISTEMAS

FABÍOLA RENATA ALVES ROBERTO

Esta Dissertação foi julgada e aprovada em sua forma final para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal da Paraíba**.**

João Pessoa, 28/08/2020.

Prof. Roberto Quirino do Nascimento, Dr.
(Orientador)

Prof. Hugo Harry Frederico Ribeiro Kramer, Dr.
(Examinador Interno)

Prof. Raphael Harry Frederico Ribeiro Kramer, Dr.
(Examinador Externo)

Prof. José Miguel Aroztegui Massera, Dr.
(Examinador Externo)

Emitido em 28/08/2020

FOLHA Nº FRFR/2021 - CI - DCC (18.59)
(Nº do Documento: 1)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 20/08/2021 10:12)
ROBERTO QUIRINO DO NASCIMENTO
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
337293

(Assinado digitalmente em 26/08/2021 08:55)
JOSE MIGUEL AROZTEGUI MASSERA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
1936480

(Assinado digitalmente em 20/08/2021 16:11)
HUGO HARRY FREDERICO R KRAMER
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
2366533

Para verificar a autenticidade deste documento entre em https://sipac.ufpb.br/documentos/ informando seu número: **1**, ano: **2021**, documento (espécie): **FOLHA**, data de emissão: **20/08/2021** e o código de verificação: **26d49119a5**

RESUMO

A necessidade de serem desenvolvidos agroecossistemas mais sustentáveis é urgente, sendo assim, vários esforços são feitos para serem inseridas estratégias alternativas sobre as variáveis ambientais, sociais e econômicas. Por isso, essa temática passou a despertar relevantes debates nas áreas que abrangem a produção agrícola e a desafiar pesquisadores a tratarem desse assunto em diferentes perspectivas. Consequentemente, diversos modelos de avaliação da sustentabilidade agroecossistêmica foram propostos, mas nem sempre aplicados. Um dos primeiros esforços desenvolvidos é a estrutura para a avaliação da gestão sustentável da terra por Gameda e Dumanski (1995). No entanto, pouco se tem visto trabalhos que desejaram maximizar essa sustentabilidade empregando modelagem matemática. Portanto, o presente trabalho busca maximizar o índice de sustentabilidade de agroecossistemas proposto por Rodrigues (2018) bem como maximizar a produção total desses por meio da otimização multiobjetivo. Para implantação do modelo, recorreu-se aos dados de 4 agroecossistemas obtidos por Reis (2013), favorecendo a realização da modelagem matemática e da aplicação do método. Após a formulação do problema, para a implementação foi empregado o Matlab com auxílio do *toolbox* CVX. A solução encontrada para o problema é considerada viável e ótima, pois constatou-se que foi atingida a maximização do Índice de Sustentabilidade dos agroecossistemas estudados, bem como a produção total destes. Finalizou-se concluindo que este trabalho revelou que os resultados encontrados conseguiram ser melhores do que no estudo desenvolvido por Rodrigues (2018).

Palavras-chave: Sustentabilidade; Pesquisa Operacional; Programação Geométrica.

ABSTRACT

The need to develop more sustainable agro-ecosystems is urgent, therefore, several efforts are made to insert alternative strategies on environmental, social and economic variables. For this reason, this theme started to raise relevant debates in the areas that include agricultural production and to challenge researchers to portray this subject in different perspectives. Consequently, several models for assessing agro-ecosystem sustainability have been proposed, but not always applied. One of the first efforts made is the framework for the evaluation of sustainable land management by Gameda and Dumanski (1995). However, little has been seen in studies that wished to maximize this sustainability using mathematical modeling. Therefore, the present work seeks to maximize the sustainability index of agroecosystems proposed by Rodrigues (2018) as well as to maximize their total production, through multiobjective optimization. To implement the model, data from 4 agroecosystems obtained by Reis (2013) were used, favoring the realization of mathematical modeling and application of the method. After formulating the problem, Matlab was used for the implementation with the aid of the CVX toolbox. The solution found for the problem is considered feasible and optimal, since it was found that the maximization of the Sustainability Index of the studied agroecosystems was achieved, as well as their total production. It ended by concluding that this work revealed that the results found managed to be better than in the study developed by Rodrigues (2018).

Keywords: Sustainability; Operational Research; Geometric Programming.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter sido minha força e meu refúgio, sobretudo, nos dias que estive só, distante dos meus pais e amigos. Sem Ele, tenho certeza de que não teria chegado até aqui.

Aos meus pais, Evanilza e Francisco, que, apesar da distância, sempre se fizeram presentes e não mediram esforços para que eu tivesse o melhor em qualquer circusntância. Em especial a minha mãe que, quando podia ia me visitar e cuidar de mim. Pelos muitos momentos que estive ausente e eles sempre compreenderam.

Aos meus irmãos, Fernanda e Fernando, que sempre me deram apoio e motivação para que eu me mantivesse forte durante os períodos mais difíceis, além de me ajudarem quando necessitei.

Ao meu orientador, Professor Quirino, pela paciência e pelos ensinamentos durante esse percurso.

Aos meus amigos (as) de Coremas que, independentemente da distância, em todo o momento se fizeram presentes me dando suporte e aconchego.

Aos laços que fiz ao longo do mestrado, que fizeram com que tudo se tornasse mais leve, principalmente nos momentos mais estressantes: Doris, Thais, Jula, Ruan, Flávio, Rômulo, Leonardo e Yukio. E a todos os outros amigos que me ajudaram, direta ou indiretamente.

À secretária Ana por toda atenção, carinho e paciência.

Agradeço também à minha banca examinadora, Hugo, Raphael, e José pela disponibilidade e contribuições para este trabalho.

À CAPES pelo subsídio financeiro para a minha pesquisa.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Relação positiva e negativa para análise das variáveis 26
Quadro 2 - Estado de sustentabilidade de acordo com o índice 26
Quadro 3 - Indicadores de Sustentabilidade em Agroecossistemas 47
Quadro 4 - Dados para a cultura da banana irrigada 47
Quadro 5 - Descrição das variáveis e suas siglas 48
Quadro 6 - Descrição dos parâmetros e suas siglas..... 48
Quadro 7 - Características dos Agroecossistemas Modernos..... 55
Quadro 8 - Solução do problema para os Agroecossistemas..... 56
Quadro 9 - Índice de sustentabilidade 56
Quadro 10 - Solução do problema utilizando a otimização biobjetivo 59
Quadro 11 – Índice de sustentabilidade utilizando a otimização biobjetivo 63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma da modelagem 28

LISTA DE SIGLAS

DA - Dimensões de Análise

FESLM - *Framework for Evaluating Sustainable Land Management*

IDEA - Índice de Sustentabilidade Explorações Agrícolas

IDS - Índice de Desenvolvimento Sustentável

IS – Índice de Sustentabilidade

MESMIS - *Marco para Evaluación de Sistemas de Manejo de Recursos Naturales incorporando Indicadores de Sustentabilidad*

MOO - *Multi-objective Optimization*

PG – Programação Geométrica

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

OM- Otimização Multiobjetivo

OT- Recorte Temporal

RSL - Revisão Sistemática da literatura

UA - Unidade de Análise

VPL - Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 10

1.1. Contextualização do Tema e Identificação do Problema de Pesquisa..... 10

1.2. Objetivos..... 12

1.2.1. Objetivo Geral 12

1.2.2. Objetivos Específicos 12

1.3. Justificativa..... 12

1.4. Estrutura do Trabalho 14

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 15

2.1. Sustentabilidade e Desenvolvimento Sustentável 15

2.2. Agroecossistemas 17

2.2.1. Sustentabilidade nos agroecossistemas 18

2.3. Indicadores de Sustentabilidade 20

2.3.1. Indicadores de Sustentabilidade Agrícola 22

2.3.1.1. Índice de Desenvolvimento Sustentável 24

2.4. Modelagem Matemática 27

2.5. Otimização..... 29

2.5.1. Otimização na Sustentabilidade..... 31

2.5.1.1. Otimização na Sustentabilidade em Agroecossistemas 32

2.5.2. Otimização Multiobjetivo..... 33

2.5.2.1. Métodos de Escalarização 36

2.5.2.2. Método da Ponderação..... 38

2.5.2.3. Método das ε − Restrições 39

2.5.2.4. Método das Métricas Ponderadas..... 39

2.6. Programação Geométrica 40

2.6.1. O problema Primal de Programação Geométrica Posinomial 42

2.6.2. O problema dual de programação geométrica posinomial 42

2.6.3. O problema primal de programação geométrica signomial..... 43

2.6.4. Condensação em programação geométrica signomial..... 43

2.6.4. Um método de solução para o problema de programação geométrica signomial baseado em condensação..... 44

3. MODELO DE OTIMIZAÇÃO 45

3.1. Dados do Modelo..... 45

3.1.1. Indicadores de Sustentabilidade 46
3.2. Formulação do Problema 47
3.2.1. Definição das Restrições 48
3.2.2. Função Objetivo 51
3.3. Definição do Problema 52
3.4. Implantação Computacional 53
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 54
4.1. Teste do Modelo de Otimização em Agroecossistemas 54
4.2. Comparação dos resultados dos modelos 54
4.2. Índice de Sustentabilidade 62
4.3. Solução do Modelo 63
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 64
REFERÊNCIAS 65

1. INTRODUÇÃO

1.1.Contextualização do Tema e Identificação do Problema de Pesquisa

Com o aumento da população e dos recursos financeiros, aumenta-se a pressão em cima dos sistemas agrícolas e naturai. Como consequência, espera-se que o homem não produza somente alimentos, como também trabalho, recursos, água tratada, preservação da variedade biológica, entre outros. Sendo assim, é importante gerenciar as vantagens e desvantagens que podem aparecer conforme a produção de alimentos se relaciona com outros elementos dos sistemas agrícolas sustentáveis (MILLENIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2005).

A perfomance no ramo agrícola é fundamental para atingir o avanço sustentável e o bem-estar no mundo todo (BEZLEPKINA *et al*., 2010), proporcionando o emprego da sustentabilidade e a igualdade dos recursos naturais para as gerações (UNWCED, 1987).

O crescimento da sustentabilidade nas pequenas propriedades agrícolas exige alternativas que beneficiem e consolidem a produção e renda das propriedades, empregando os insumos de forma apropriada, ao mesmo tempo que reduzem os efeitos negativos no meio (ZHANG *et al*., 2015). Desse modo, as práticas de sustentabilidade agrícola passaram a tentar restringir o emprego de fertilizantes e pesticidas, porém, em contrapartida, necessita-se mais de rotação de culturas, resíduos, estrume, adubo verde, entre outros hábitos, com a finalidade de melhorar o solo e controlar as pragas.

De acordo com Camelo e Candido (2015), as perguntas que incidem ao redor da sustentabilidade se dirigem à criação de indicadores que se tornem apropriados a avaliar as particularidades de um agroecossistema, procurando detectar como este se expõe no que concerne à sustentabilidade.

Uma das etapas mais complicadas nas análises feitas com indicadores é o reconhecimento dos limites que indicam a sustentabilidade (VAN DER WERF *et al.*, 2007). Especificações ou funções são empregadas para transformar variáveis biofísicas em escores (por exemplo, FINIZIO *et al*., 2001) que retratam diferentes graus avaliativos de sustentabilidade.

Tais indicadores precisam representar as modificações nas características de produção, recuperação, equilíbrio e igualdade. É preciso destacar que não existem

indicadores “genéricos”, pois cada sistema está sujeito às suas particularidades e elementos próprios, sendo assim, tem seu conjunto de indicadores exclusivo (DE CAMINO; MULLER, 1993).

Segundo Sabatino *et al*., (2015) os mensuradores sustentáveis podem ser empregados em métodos de otimização para obter estratégias mais adequadas que balanceiam os três pilares da sustentabilidade (social, econômico e ambiental). Contudo, a otimização instalada nesses métodos, normalmente é realizada sob uma só condição, ou econômica, ou ambiental ou social (de MEYER *et al.*, 2014), mas também, alguns casos otimizam as três perspectivas conjuntamente (YUE et *al.*, 2014).

Constantemente, esses tomadores de decisão estão empenhados na otimização de, não somente um objetivo, como também, em atingir um resultado que seja capaz de atender a um conjunto de objetivos que representam uma natureza conflitante (FATURETO, 1997).

Sendo assim, as técnicas de otimização multiobjetivo (*Multi-objective Optimization* - MOO) são uma significativa temática de pesquisa para a engenharia e a ciência, não simplesmente por conta dos vários objetivos que a realidade proporciona, mas, uma vez que também há várias perguntas a serem respondidas nesta área (ZITZLER, 1999).

A MOO possibilita a otimização de sistemas conforme diferentes parâmetros, envolvendo vertentes ambientais e econômicas (AZAPAGIC, 1999). Particularmente, a MOO pode se referir às preocupações ambientais com intuito de tomar decisões e não como restrições impostas ao sistema (CHANKONG; HAIMES, 1983, EHRGOTT, 2000).

No setor agrícola, as técnicas de otimização têm sido utilizadas com êxito no gerenciamento de recursos em áreas áridas e semiáridas. Através destas técnicas, Xevi e Khan (2005) aplicaram a MOO para otimizar as operações de reservatório e alocação de água para irrigação, ao passo que Chen *et al*., (2013) as empregaram para efetuar a alocação ótima de múltiplos reservatórios em uma bacia. MOO também foi usada para a realização do planejamento anual de mistura de culturas como um problema de maximização simultânea do lucro líquido e da produção agrícola (ADEKANMBI; OLUGBARA; ADEYEMO, 2014) e para o planejamento agrícola que aloca otimamente áreas de cultivo irrigadas e de sequeiro (GALÁN-MARTÍN *et al*., 2016).

Diante do que foi exposto, pode-se constatar que a lacuna encontrada na literatura se refere aos poucos trabalhos desenvolvidos em torno da sustentabilidade, modelagem e otimização multiobjetivo. Porém não foi localizado nenhum que visasse a maximização da produção e do índice de sustentabilidade de agroecossistemas, corroborando assim, para a oportunidade desta pesquisa.

Sendo assim, este trabalho apresenta a seguinte pergunta de pesquisa:

Avaliando um agroecossistema por meio de um índice de sustentabilidade, como se pode gerenciá-lo para a maximização deste índice e da produção total simultaneamente?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Elaborar e resolver um modelo de otimização para agroecossistemas que maximize simultaneamente a produtividade e o índice de sustentabilidade proposto por Rodrigues (2018).

1.2.2. Objetivos Específicos

- Explorar os conceitos e abordagens de sustentabilidade, desenvolvimento sustentável, agroecossistemas, indicadores de sustentabilidade, modelagem matemática e otimização.
- Estudar e selecionar os métodos existentes na literatura, que avaliam a sustentabilidade agrícola por meio de indicadores;
- Relacionar os indicadores de sustentabilidade com os agentes dos agroecossistemas estudados;
- Construir um modelo de otimização dos agroecossistemas;
- Aplicar um método de otimização multiobjetivo para a resolução do problema;
- Propor soluções que contribuam para a maximização do índice de sustentabilidade e a da produtividade.

1.3. Justificativa

Visando a manutenção da produtividade das terras agrícolas em longo prazo, é necessária uma produção mais sustentável de alimentos, que pode ser alcançada através de práticas agrícolas alternativas, com conhecimento e preservação dos processos

ecológicos que ocorrem nos agroecossistemas. Com mudanças na produção de alimentos, pode se condicionar a mudanças socioeconômicas que possibilitam a sustentabilidade em todo o sistema alimentar (GLIESSMAN, 2008).

Na agricultura brasileira muito tem sido pesquisado na área de novas tecnologias, aperfeiçoamento dos processos produtivos e novos produtos, porém pouco tem sido desenvolvido na ótica de avaliar a sustentabilidade das atividades agrícolas (SOUZA, 2013).

Estudar formas de avaliação de sustentabilidade é importante pois se mostra capaz de fornecer um diagnóstico sobre como estão se desenvolvendo as práticas sustentáveis no campo, identificando os fatores que possam estar interferindo positivamente e negativamente na sustentabilidade.

Diversos modelos de avaliação da sustentabilidade foram propostos, mas nem sempre aplicados. Um dos primeiros esforços desenvolvidos foi o *Framework for Evaluating Sustainable Land Management* (FESLM; GAMEDA E DUMANSKI, 1995).

Apesar deste progresso, a disseminação de estruturas, indicadores e resultados de avaliações sustentáveis tem sido lenta. Um esforço importante nessa direção é a coleta de estudos de avaliação de sustentabilidade de ecossistemas, nos quais foi aplicado o arcabouço para a avaliação de sistemas de gestão, usando indicadores de sustentabilidade chamado *Marco para Evaluación de Sistemas de Manejo de Recursos Naturales* (MESMIS, na sigla em espanhol) (MASERA; LÓPEZ-RIDAURA, 1999).

Segundo Engau (2009) muitos problemas decisórios de gestão ou financiamento, bem como vários outros problemas, exigem a consideração simultânea de vários objetivos e, assim, são muitas vezes modelados e resolvidos por meio de métodos de programação multiobjetivo e de tomada de decisão multicritério.

Portanto, a importância de modelos matemáticos em agroecossistemas sustentáveis pode ser percebida pelo desenvolvimento de pesquisas no âmbito acadêmico que são realizadas no sentido de auxiliar nas discussões a respeito do tema, as quais consideram a incerteza dos níveis de produção devido as condições climáticas, diferentes períodos de crescimento e colheita, entre outros (GHADERI *et al*., 2016).

Sendo assim, este estudo demonstra sua importância por contribuir com a literatura acadêmica, avançando no conhecimento ao aplicar um método que consegue integrar múltiplos objetivos ao mesmo tempo com o intuito de maximizá-los.

Como colaboração prática com ajuda da modelagem, consegue-se apontar as variáveis que devem receber investimentos para a melhoria da sustentabilidade dos agroecossistemas estudados bem como o conhecimento de quais agentes influenciam, tanto de forma positiva quanto de forma negativa, na produtividade destes.

1.4. Estrutura do Trabalho

Esta dissertação é composta por cinco capítulos. O primeiro capítulo, conforme já foi apresentado, explana a respeito da contextualização do tema, da identificação do problema de pesquisa juntamente com os objetivos (geral e específicos), da justificativa que recai sobre esta temática abordada e, por último, da estrutura deste.

O segundo capítulo, exibe a fundamentação teórica sobre a temática escolhida na pesquisa. O terceiro trata da construção do modelo de otimização e sustentabilidade no agroecossistema, o qual compõe os dados da localidade selecionada para exploração, a definição das variáveis de decisão, dos parâmetros, restrições e função-objetivo, consequentemente, a formulação do problema bem como sua implementação computacional com o intuito de encontrar a sua solução.

No quarto capítulo são exibidos e discutidos os resultados encontrados. Por fim, no capítulo 5, são apresentadas as considerações finais do trabalho, destacando as principais contribuições da pesquisa, as limitações e as sugestões para pesquisas futuras.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são exibidos os conceitos e temáticas necessárias ao conhecimento e aprofundamento dos assuntos abordados neste trabalho, tendo como intuito fornecer subsídios teórico para ele.

2.1. Sustentabilidade e Desenvolvimento Sustentável

Desde a publicação do relatório BRUNDTLAND "Nosso Futuro Comum" (WCED, 1987) várias definições de sustentabilidade e desenvolvimento sustentável foram oferecidas cobrindo aspectos ambientais e socioeconômicos.

A palavra sustentabilidade é frequentemente utilizada em muitas combinações diferentes: desenvolvimento sustentável; crescimento sustentável; comunidade sustentável; indústria sustentável; economia sustentável; agricultura sustentável; etc. Etimologicamente, sua origem vem do latim "*sustentare*", que significa suster, sustentar, suportar, conservar em bom estado, manter, resistir. Dessa forma, compreende-se que sustentável é tudo aquilo que é capaz de ser suportado, mantido (SICHE *et al.*, 2007).

Hansen (1996) considera que a sustentabilidade deve ser uma quantidade contínua, caracterizada por uma medida integrada única de uma gama de possíveis determinantes da mesma. Esta medida única permite comparar ações diferentes a serem tomadas em uma base comum. Mas parece-nos que uma única medida de sustentabilidade apresenta dificuldades insolúveis. Se é difícil chegar a um consenso sobre os determinantes da sustentabilidade, combinar os determinantes em uma única medida exige ponderar a importância relativa deles, um trabalho que implica dificuldades adicionais.

A sustentabilidade também se refere às medidas tomadas para se assegurar que as condições ambientais e sociais apoiem a segurança humana, o bem-estar e a saúde, através da transformação dos estilos de vida das pessoas e dos modelos de produção (TAN; LU, 2016). Segundo Williams (2000), o lucro econômico, a aceitabilidade social e a conservação ambiental são os três objetivos da sustentabilidade.

A sustentabilidade pode ser dividida em dois grupos: social e ambiental. A sustentabilidade ambiental estaria ligada com o pensamento tradicional, a preservação, ou aprimoramento da base de recursos, principalmente para as gerações futuras, sendo o desafio reduzir a insustentabilidade do estilo de vida. Já a sustentabilidade social se

refere não somente ao que o ser humano pode ganhar, mas a maneira como pode ser mantida decentemente sua qualidade de vida (GOMES, 2004).

Verona (2008) vê a sustentabilidade como uma característica multidimensional de um sistema socioambiental. Para este autor, a sustentabilidade se converte, então, em um conceito que deve ser analisado de acordo com o contexto social em que está inserida a avaliação e a implementação de alternativas.

Dessa forma, a sustentabilidade também está inserida no processo de promoção da melhoria qualitativa das condições de vida da população de um país, de uma região ou de um local específico, sendo esse processo entendido como desenvolvimento sustentável (Barbieri, 2007).

A expressão “desenvolvimento sustentável” começou a ser usada no final da década de 1970 e culminou com a definição mais famosa realizada pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (Barbieri, 2007), a saber: “Desenvolvimento sustentável é aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade das gerações futuras de atenderem as suas próprias necessidades”.

A forma de desenvolvimento baseado na sustentabilidade passa a ser, a partir dos anos 90, uma nova necessidade. Trazendo o discurso para os sistemas agrícolas, aquele padrão tecnológico de crescimento e exploração dos recursos naturais que preconizava a maximização da produção agrícola a qualquer custo, na “era” da nova proposta de desenvolvimento deve ser no mínimo repensado (CARVALHO, 2007).

O desenvolvimento sustentável pode ser amplamente definido como "o processo pelo qual as necessidades materiais e espirituais da população humana serão atendidas, sem degradar e até melhorar as condições socioambientais que as sustentam" (MASERA ASTIER; LÓPEZ-RIDAURA 1999; ASTIER *et al.*, 2011).

Os objetivos do desenvolvimento sustentável desafiam as instituições contemporâneas, fazendo com que elas reagam às mudanças globais relutando em reconhecer que esse processo esteja realmente ocorrendo (VAN BELLEN, 2005).

É notório que a agricultura desempenha um papel central no desenvolvimento sustentável. Sua posição fundamental como fornecedor de nutrição humana molda a economia global e a relação da sociedade com o mundo natural, portanto, é importante alcançar um conjunto de Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) acordados

pelas Nações Unidas em 2015 (NAÇÕES UNIDAS, 2015), que vão desde acabar com a fome e pobreza até reduzir os impactos ambientais (CONSELHO ECONÔMICO E SOCIAL DAS NAÇÕES UNIDAS, 2016).

2.2. Agroecossistemas

A definição de agroecossistemas apresentado por Gliessman (2009) colabora de modo considerável para o debate a respeito da agricultura sustentável, baseando-se na necessidade do conhecimento sobre uma visão global dos processos produtivos. A palavra agroecossistemas se refere a uma propriedade agrícola, estando compreendida como um ecossistema alterado em suas múltiplas dimensões espaço-temporais, que se tem aproximado da ecofisiologia do sistema natural (ALTIERI, 2004).

Os agroecossistemas são vitais para o fornecimento de serviços ecossistêmicos à sociedade humana, mas a maioria das práticas agrícolas tradicionais tem um impacto negativo no meio ambiente (PLIENINGER *et al*., 2012). Assim sendo, a compreensão dos agroecossistemas é necessária para que haja a manutenção da produtividade agrícola minimizando os problemas ambientais (ROBOREDO; BERGAMASCO; BLEICH, 2016).

Nessa perspectiva, entender sobre agroecossistema como um conjunto de produção agrícola que abrange todos os organismos do seu sistema de modo participativo, permite a visualização das relações ecológicas, sociais e econômicas, de maneira que conserve o ecossistema manuseado.

No que diz respeito à formação de um agroecossistema, deve se considerar que acontece a partir do instante no qual o ecossistema é modificado com o intuito de aprimorar uma dada produção agrícola, inserindo alterações na estrutura e função do ecossistema natural, transformando o estado inicial do sistema (GLIESSMAN, 2009).

Todavia, os agroecossistemas podem ser conceituados como um ecossistema administrado com o intuito de produzir, difundir e consumir. Suas divisas englobam tanto o ambiente físico dedicado à produção, como os recursos, infraestrutura, mercados, agricultores e instituições envolvidas (CABELL; OELOFSE, 2012). A necessidade de amenizar as consequências e os riscos à saúde humana provocados pelos agroecossistemas tem conduzido estudos substanciais em relação ao desenvolvimento de estratégias que proporcionem a diminuição ou troca de fertilizantes sintéticos e pesticidas, a reintrodução de práticas tradicionais como a intercalação e aplicação

integrada de fertilidade e controle de pragas, além de estratégias, a fim de reduzir as perdas de energia, nutrientes e econômicas (ASTIER *et al.*, 2011).

Sendo assim, a integração de produção de culturas diversas que no passado garantiram a diversidade necessária para a estabilidade dos agroecossistemas foi perdida e, além disso, o uso da terra tem sido bastante sacrificado para expandir monoculturas ou para uso exclusivo para a pecuária. A diversidade agrária deteriorou-se, significativamente, em uma perda considerável de sustentabilidade (GUZMÁN; MOLINA; ALONSO, 2011).

Como parte da investigação científica quanto aos meios e os métodos de avaliar a sustentabilidade, muitos trabalhos têm incorporado a discussão sobre quais os indicadores adequados para este fim (CORREA, 2007).

Cabe salientar que a avaliação da sustentabilidade de agroecossistemas deve abranger as dimensões ambiental, econômica e social do sistema. É necessário que haja a tomada de decisões estratégicas para manter a produtividade das terras agrícolas em face dos preços flutuantes do mercado, além de considerarem a sustentabilidade no contexto mais amplo das políticas agrícolas nacionais e dos incentivos à gestão do campo (DI FELICE *et al*., 2012).

Avaliar essas dimensões da sustentabilidade fizeram com que fossem desenvolvidos sistemas de indicadores. Estes têm sido empregados em estudos de diversas regiões do mundo (ASTIER *et al.,* 2011).

Nesse contexto, o foco do trabalho encontra-se na grande discussão em torno da sustentabilidade em agroecossistemas e dirige-se à utilização de métodos baseados em indicadores de sustentabilidade para que se possa otimizar a produção total e o índice de sustentabilidade destes. Sendo assim, torna-se fundamental abordar a respeito tanto dos indicadores de sustentabilidade quanto do emprego destes em agroecosssistemas com a finalidade de compreender profundamente quais são os principais indicadores sustentáveis no meio agrícola e quais possibilitam medir e examinar a sustentabilidade.

2.2.1. Sustentabilidade nos agroecossistemas

O emprego da ciência e de novas tecnologias estabeleceu um novo jeito de gerenciar os recursos naturais mudando o conhecimento local. Dessa forma, o meio ambiente passou a ser dominado pelo ser humano, onde, aspirando renda e conquista de

mercados, passou a substituir o gerenciamento dos recursos e a produtividade com base sustentável por meio de processos biológicos (GUZMÀN, 2009).

Vários pesquisadores das ciências agrárias, tais como Caporal e Costabeber (2004), Altieri e Masera (1998), entre outros, ressaltam que, devido a inserção de novas tecnologias no campo, apareceu também, como consequência, a contaminação dos lençóis freáticos, desmatamento de florestas, danos à biodiversidade, degradação do solo, crescimento do uso de agrotóxicos e outros insumos. Dessa forma, a capacidade econômica do agronegócio tornou a agricultura em importação, exportação e devastação do meio ambiente, produzindo uma modificação cultural na sociedade (JUNGES, 2008).

Com isso, no final dos anos 80, iniciou-se o avanço em torno das discussões sobre a sustentabilidade, especialmente após o lançamento do Relatório de Brundtland (EHLERS, 1999). Assim, surge a nível mundial um maior entendimento da imprescindibilidade de novas técnicas que favoreçam o desenvolvimento de agroecossistemas sustentáveis, aspirando a segurança no preparo de alimentos e na preservação do meio ambiente (ALTIERI; NICHOLLS, 2000).

Ainda de acordo com Ehlers (1999), há um aparecimento de um conjunto de descrições que buscam explicar o que se compreende como “Agricultura Sustentável”. A maioria das definições tentam expor a necessidade da formação de um modelo de produção que consiga minimizar os danos causados à natureza e que mantenha, ao máximo, as particularidades dos agroecossistemas por um longo período de tempo. Com essa perspectiva, ocorreu uma propensão a desenvolver uma agricultura que combine os mecanismos convencionais com os alternativos.

Na percepção de Gliessman (2003), é recomendado ter o conhecimento de que cada ecossistema tem uma capacidade de produção, e ainda que os suportes do enfoque agroecológico pretendem conservar a produção agrícola, preservando a capacidade produtiva do solo, as propriedades e a quantidade dos alimentos a longo prazo. A perspectiva agroecológica examina os ecossistemas agrícolas conforme as principais unidades de estudos, suas características e interações que acontecem com elas.

Nesse sentido, a prática agrícola com apoio ecológico colabora para a restauração do balanço energético de determinado complexo por meio do desempenho sustentável de sistema produtivo e da conservação da biodiversidade, dado que a

presença da variedade de espécies agindo no meio, haverá interações entre os agentes do ecossistema, na qual, alguns elementos serão empregados na geração de outros. Como exemplos, podem ser citados: ervas daninhas utilizadas como forragem, esterco utilizado como fertilizante, dentre outros (Altieri e Nicholls, 2000).

De acordo com Gliessman (2003) a inserção de diversas espécies em um sistema produtivo, a rotação de plantios, e o fato de possibilitar a variedade biológica, irão propiciar a resistência do sistema diante das dificuldades, pois serão traçados agroecossistemas com versatilidade, resistência e capacidade de sobreviver ao longo do tempo.

Ainda que a relevância da sustentabilidade seja constatada em todo o mundo, esta possui pouca ou quase nenhuma presença nas políticas públicas. Quando a sustentabilidade tem seu foco apenas na dimensão econômica, parecem lógicas as distorções que ameaçam a sustentabilidade, como por exemplo, as que não levam em consideração aspectos sociais dos atores envolvidos e as bases ecológicas de manutenção dos recursos naturais (ALTIERI, 2004).

Segundo este mesmo autor, torna-se visível que a sustentabilidade agrícola se encontra enraizada na conservação da produção e no lucro das unidades produtivas, reduzindo, ao mesmo tempo, impactos ambientais. Enfatiza-se que a atividade econômica deve atender as deficiências presentes, sem limitar as possibilidades futuras, ou seja, os recursos indispensáveis para o futuro não podem ser esgotados para atender o consumo atual.

Altieri (2004) ressalta a exigência de definir o conceito de sustentabilidade, que abrange compreender e agregar a variedade de preferências, prioridades e concepção dos objetivos nos quais vai ser apoiado. Deve ser definida localmente, por meio de processos que procurem uma exposição apropriada entre as diferentes escalas de avaliações, ora regional, nacional ou mundial.

2.3. Indicadores de Sustentabilidade

Na última década do século XX, desenvolveu-se o interesse pela busca de indicadores de sustentabilidade por parte de organismos governamentais, não governamentais, institutos de pesquisa e universidades em todo o mundo (MARZALL, 2000).

Os indicadores podem ser compreendidos como instrumento que permite mensurar as modificações nas características de um determinado sistema (DEPONTI; ECKERT; AZAMBUJA, 2002) e avaliar uma situação presente e sua tendência de comportamento, bem como estabelecer um termo de comparação em escala temporal e espacial (CORRÊA, 2008).

O objetivo dos indicadores é agregar e quantificar informações, de modo que sua significância fique mais aparente. Segundo o autor, eles simplificam as informações sobre fenômenos complexos tentando melhorar, com isso, o processo de comunicação (VAN BELLEN, 2006).

Para que a escolha dos indicadores seja coerente com os propósitos da avaliação é necessário que se tenha clareza sobre alguns pontos importantes: - O que avaliar? – Por que avaliar? De que elementos constam a avaliação? – De que maneira serão expostos, integrados e aplicados os resultados da avaliação para o melhoramento do perfil dos sistemas analisados? (DEPONTI; ECKERT; AZAMBUJA, 2002).

De acordo com Camino e Müller (1993), Masera *et al.*, (1999) e Marzall (2000), algumas características importantes devem ser consideradas na definição dos indicadores. O indicador deve: 1. ser significativo para a avaliação do sistema; 2. ter validade, objetividade e consistência; 3. ter coerência e ser sensível a mudanças no tempo e no sistema; 4. ser centrado em aspectos práticos e claros, fácil de entender; 5. permitir enfoque integrador, ou seja, fornecer informações condensadas sobre vários aspectos do sistema; 6. ser de fácil mensuração, baseado em informações facilmente disponíveis e de baixo custo; entre outras.

Critérios a serem considerados na seleção de indicadores incluem 1) confiança de que os vínculos entre o indicador e o que ele pretende representar são bem compreendidos, não ambíguos e sensíveis, 2) confiabilidade e precisão das informações transmitidas e 3) a facilidade e o custo do monitoramento do indicador ao longo do tempo (PANNELL; GLENN, 2000).

O processo de seleção de indicadores, para além de obedecer a um conjunto de critérios definidos na proposta metodológica, devem se inserir, pelo menos, numa das três dimensões de sustentabilidade - ambiental, econômica e social - e integrar-se numa das quatro propriedades consideradas, por Müller (1996), como as mais importantes dos sistemas sustentáveis: produtividade; estabilidade; resiliência e equidade.

O valor numérico de um indicador escolhido pode ser estimado de várias maneiras. Indiscutivelmente a abordagem mais robusta (e, portanto, desejável) é a medição direta via coleta de dados primários no campo. Os custos de coleta de dados, no entanto, podem ser proibitivamente altos, especialmente para avaliações de múltiplos indicadores em larga escala (CARLETTO *et al*., 2015).

Um indicador de sustentabilidade constitui um instrumento que permite, a partir da sua interpretação, definir a condição de um sistema como sustentável ou não. Ele é apenas uma medida cuja avaliação evidencia o limite estabelecido de acordo com os valores e objetivos, que regem se uma determinada realidade foi ultrapassada ou respeitada (MARZALL; ALMEIDA, 2000, COSTA, 2010).

Vale salientar que as mudanças ocorridas no decorrer do tempo influenciam o conhecimento científico e aumentam os valores sociais, originando a necessidade de indicadores diferentes. Por outro lado, não existindo indicadores previamente definidos, a sua identificação acentua, obviamente, o carácter subjetivo da seleção e, portanto, da avaliação da sustentabilidade. Para ultrapassar esta lacuna, Masera *et al*., (1999) propõem que a seleção de indicadores deve ser realizada por uma equipe multidisciplinar, baseada na seleção participativa dos envolvidos na avaliação (COSTA, 2010).

Perante esse cenário, faz-se apropriado discorrer a respeito de os sistemas de indicadores de sustentabilidade empregados na agricultura, sobre a relevância de se ter metodologias que estabeleçam indicadores em relação aos sistemas agrícolas bem como as vantagens de usar tais metodologias.

2.3.1. Indicadores de Sustentabilidade Agrícola

Ultimamente, diversos indicadores têm sido usados em pesquisas abordando sustentabilidade no setor agrícola, entre eles: consumo de água, aproveitamento do solo, produção de resíduos, produtividade, agrobiodiversidade, manutenção da mata nativa, nível educacional, saúde humana, estruturas do sistema, uso da terra, rendimento de cultivos, sanidade vegetal e animal, entrada de produtos agrícolas externos, atividades comunitárias, disponibilidade de mão de obra, acesso à terra, comercialização e consumo de energia (CALORIO, 1997; CÁCERES, 2006).

Designar indicadores, especialmente a nível de explorações agrárias, aponta vantagens como: melhor definição de políticas de âmbito local; avaliação das

consequências de muitos processos que afetam o ambiente; e a possibilidade de examinar os ecossistemas desde uma perspectiva local até a global.

O emprego de indicadores de sustentabilidade em agroecossistemas consegue analisar as estruturas (disponibilidade de recursos, acessibilidade, diversidade e equidade), funcionamento (produtividade, eficiência, eficácia), organização ou critérios como estabilidade, resiliência, capacidade e tempo para responder (VADREVU *et al*., 2008).

A seleção de um conjunto de indicadores deve servir para avaliar o sistema e possibilitar seu monitoramento, a fim fornecer informações que demonstrem se o sistema de manejo utilizado é sustentável; além disso, deve permitir a identificação dos aspectos que precisam ser alterados ou melhorados. Para Gliessman (2005, p.566), os indicadores permitem "prever se um determinado agroecossistema pode, ou não, ser sustentável a longo prazo, e desenhar agroecossistemas que tenham a melhor chance de se mostrar sustentáveis".

Os indicadores medem condições específicas do agroecossistema que são necessárias à sustentabilidade de forma a determinar o nível ou condição que esses parâmetros devem manter para funcionar de maneira sustentável (GLIESSMAN, 2005).

Os indicadores utilizados para o monitoramento das unidades de produção devem ser sensíveis aos métodos de manejo e compatíveis com um período de tempo propício à verificação (VADREVU *et al*., 2008).

Deste modo, a literatura colaborou de forma significativa ao desenvolver conjuntos de indicadores agrícolas que auxiliam na avaliação da sustentabilidade de agroecossistemas. Os conjuntos de indicadores mais conhecidos são mostrados a seguir.

O MESMIS é um sistema de indicadores agrícolas desenvolvido no México por Masera *et al.* (1999), a partir de uma seleção de critérios de diagnósticos e de indicadores que, possibilitam avaliar o manejo dos recursos naturais, permitindo uma visualização do comportamento de uma unidade rural de uma forma mais ampla.

Conforme Verona (2008), os critérios do MESMIS para avaliação de sustentabilidade de agroecossistemas devem contemplar as dimensões ambiental, econômica e social, sendo necessário um conjunto de indicadores que permitam uma avaliação qualitativa e quantitativa.

O Índice de Desenvolvimento Sustentável - IDS (S^3) desenvolvido na Costa Rica por Sepúlveda (2008), tem como objetivo propor um método que facilite a avaliação de sustentabilidade de projetos e atividades fundamentadas nos princípios do desenvolvimento sustentável. Sepúlveda (2008) esclarece que esta metodologia parte para a construção de indicadores como um instrumento com o qual se pode determinar a sustentabilidade, calculando diversos índices de desenvolvimento, correspondentes a cada dimensão de análise e em cada território rural, que, por fim, integrados, formam o Índice de Desenvolvimento Sustentável relativo a cada território, ou mesmo um só índice para todas as regiões analisadas.

O método IDEA (Indicadores de Sustentabilidade das Explorações Agrícolas) é mais um sistema de indicadores, desenvolvido na França por Vilain (2000), com o intuito de avaliar a sustentabilidade das práticas agrícolas naquele país. Jesus (2003) esclarece que o método comporta três eixos, escalas ou dimensões de sustentabilidade independentes e não acumulativas: a "agroambiental", a "sócio territorial" e a "econômica". Ele explica que o método IDEA não apresenta um limite fixo para a sustentabilidade, e as comparações e análises devem ser feitas entre grupos de propriedades de cada região, entre diferentes sistemas de produção.

Consequentemente, a avaliação da sustentabilidade a partir desses grupos de indicadores permitirá ao pesquisador e ao agricultor uma compreensão atual do agroecossistema, um panorama futuro, as necessidades e possibilidades de mudança. A partir disso, o agricultor terá em mãos opções que poderão levá-lo à trajetória da sustentabilidade e aprimorar o cenário ambiental, social e econômico da agricultura familiar (CORREA, 2007).

Nessa lógica, compete ressaltar o método IDS (S^3) foi a metodologia escolhida como base para a indicação de sustentabilidade dos agroecossistemas estudados neste estudo, já que sua aplicação está atrelada à resiliência, produtividade, equidade e autonomia no gerenciamento de territórios rurais.

2.3.1.1. Índice de Desenvolvimento Sustentável

O Índice de Desenvolvimento Sustentável é uma metodologia utilizada para mensurar, quantitativamente, o nível de sustentabilidade de unidades de análise, tendo como base o conceito de desenvolvimento sustentável e metodologia interdisciplinar.

Essa ferramenta traz no seu foco metodológico o conceito de uma perspectiva multidimensional do processo de desenvolvimento sustentável, partindo da definição de indicadores como instrumentos com os quais se podem medir os diversos índices de desenvolvimento de cada unidade de análise com enfoque comparativo, pois, quando analisados integralmente, esses índices formam o Índice de Desenvolvimento Sustentável – IDS (S^3) da unidade de análise (UA) (SEPÚLVEDA, 2008).

O instrumento de análise utiliza o enfoque sistêmico – escalar, multidimensional e intertemporal –, em que o desenvolvimento sustentável deve expor questões que se referem à avaliação de desenvolvimento rural sustentável, dispondo como foco a relação homem-natureza (REIS, 2013).

O parâmetro de sustentabilidade de cada dimensão é atingido pela média aritmética de seus indicadores, ou seja, é calculada a média aritmética dos indicadores ambientais e, com os valores dos índices de sustentabilidade de cada dimensão, chega-se ao S^3.

De acordo com Reis (2013), os passos apresentados abaixo permitem a compreensão do processo de avaliação da sustentabilidade dessa metodologia.

1. Fazer o recorte geográfico e definir a unidade de análise;
2. Definir o recorte temporal (OT);
3. Definir dimensões de análise (DA);
4. Definir indicadores e fundamentá-los teoricamente;
5. Definir função relação: se positiva: (+) ou negativa (-);
6. Escolher o método biograma: 1- valores observados, 2- limites de flutuação e 3 - níveis ótimos;
7. Calcular nível máximo, mínimo e média;
8. Calcular o Índice.

As dimensões dialogam com o aspecto ambiental, focado nos recursos naturais básicos, com o econômico, visando ter atividades produtivas como instrumento de sustentação da segurança alimentar e nutricional e com o comercial, atividade básica do sistema agrícola, para suprir a reprodução social e a político-institucional, visando relações e estratégias públicas e privadas. Todas as dimensões são consideradas como base para se avaliar a sustentabilidade e representá-la como um índice ou no gráfico biograma (REIS, 2013).

A definição dos indicadores se relaciona à UA e ao problema investigado. A observação temporal pode ser fixa ou evolutiva, esta podendo ser década, ano, mês, semana, dia, etc (REIS, 2013).

Para cada indicador, é estabelecida a função relação positiva ou negativa, isto é, o aumento do valor do indicador reflete a melhor ou pior situação do estado de sustentabilidade. Considera-se que os dados utilizados se referem a diferentes UAs, contudo, faz-se necessário a padronização dos indicadores, a fim de que se comparem os índices.

O cálculo do índice depende da relação de cada indicador. De acordo com a função relação, são adotadas fórmulas diferentes. Por exemplo: para um índice de valores entre 0 e 1, quanto mais alto for seu valor, melhor será o estado de sustentabilidade da UA. Sendo assim, um indicador de taxa de empregabilidade, tendo relação positiva com o processo de equidade social, terá um índice tão mais alto quanto mais alto for seu valor.

O contrário pode ocorrer com a redução da taxa de empregabilidade, ou seja, quanto maior for seu valor, menor será o índice, uma vez que o desemprego tem relação negativa com a equidade social. A função relação é diferenciada pelos sinais + (positivo) e – (negativo), os cálculos dessas relações são descritos no Quadro 1.

Quadro 1 – Relação positiva e negativa para análise das variáveis

Relação positiva $I = \frac{x-m}{M-m}$ (1)	**Relação negativa** $I = \frac{M-x}{M-m}$(2)
Onde: I = índice calculado referente a cada variável, para cada território analisado; x = valor observado de cada variável em cada território analisado; m = valor mínimo considerado; M = valor máximo considerado.	

Fonte: Carvalho (2011).

Os índices de sustentabilidade podem ser avaliados de diferentes maneiras: unidade de análise ou território, dimensões ou indicadores (SEPÚLVEDA, 2008). Além do cálculo do S³ e da representação biograma considerado como instrumento complementar, há cinco cores padronizadas que permitem tornar mais fácil a leitura e a compreensão dos biogramas (Quadro 2).

Quadro 2 – Estado de sustentabilidade de acordo com o índice

Colapso	Crítico	Instável	Estável	Ótimo
0 0,2	0,4	0,6	0,8	1

Fonte: Adaptado de Sepúlveda (2008)

Dessa forma, se o estado de sustentabilidade do agroecossistema for:

- 0,0 a 0,2 (cor vermelha), indica nível em colapso de sustentabilidade;
- 0,2 a 0,4 (cor laranja), indica nível crítico de sustentabilidade;
- 0,4 a 0,6 (cor amarela), indica nível instável de sustentabilidade;
- 0,6 a 0,8 (cor azul), indica nível estável de sustentabilidade;
- 0,8 a 1 (cor verde), indica nível ótimo de sustentabilidade.

Diante desse contexto, torna-se significativo compreender os estudos que vêm sendo realizados em otimização de agroecossistemas e como se fundamenta a construção dos modelos matemáticos nesse ambiente.

2.4. Modelagem Matemática

Se produzir ciência for a competência de observar e relatar fenômenos naturais, sociais, econômicos, entre outros, a matemática possui importância essencial na definição desses fenômenos, processos ou sistemas, a medida que busca reproduzir as particularidades de um objeto real com o intuito de representá-lo, originando os modelos matemáticos (ARENALES *et al.*, 2007).

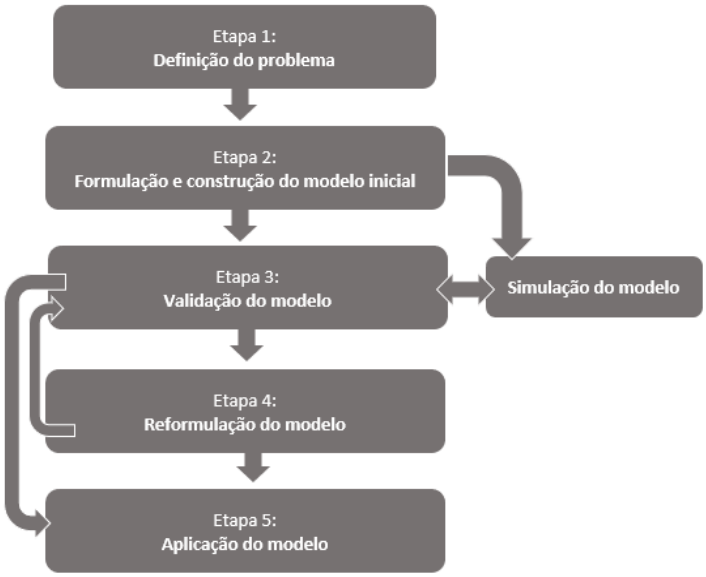
Um modelo não é igual à realidade, mas suficientemente similar para que as conclusões obtidas através de sua análise e/ou operação, possam ser estendidas à realidade. Consequentemente, para a formalização desse modelo é imprescindível definir a estrutura relacional do sistema representado (desenhos ou símbolos), o comportamento funcional de cada subsistema ou componente (funções de desempenho), e os fluxos de relacionamento (GOLDBARG; LUNA, 2005).

Os modelos podem ser classificados, quanto à natureza, como concretos (físicos, geométricos) e abstratos (matemáticos, lógicos e esquemáticos), quanto às propriedades como icônicos (fotografias, mapas), analógicos (substituição de sistemas hidráulicos por elétricos) e simbólicos (equações). Os modelos matemáticos representam as grandezas por variáveis de decisão, e as relações entre essas variáveis, por expressões matemáticas. Por tais características esses modelos necessitam de informações quantificáveis (LACHTERMARCHER, 2009).

Destaca-se que o modelo matemático não pode incorporar todas as características, tanto macroscópicas como microscópicas. Deve-se, geralmente, buscar o custo de se ter o modelo, isto é, o tempo e o esforço requeridos para obtê-lo, e verificar o nível de detalhes, tal como, os benefícios esperados de sua aplicação (GARCIA, 2009).

Sendo assim, pode-se aferir que os modelos matemáticos são considerados representações simplificadas da realidade que preservam, para determinadas situações e enfoques, uma equivalência adequada. Para Goldbarg e Luna (2005), a definição do problema é considerada uma das fases mais importantes do processo de modelagem, como pode ser percebido na Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma da modelagem



Fonte: Goldbarg e Luna (2005)

Como é possível perceber, o processo de modelagem abrange desde a definição de um problema até a aplicação do modelo formulado. Alguns exemplos de problemas podem ser verificados quando acontece a escassez de um produto ou matéria-prima, alcance de uma maior produtividade, fazendo com que sejam buscadas formas mais eficientes e eficazes de se trabalhar com recursos escassos. Para a resolução de problemas como esses, encontrados em diversas áreas de conhecimento, pode-se utilizar da modelagem matemática.

Portanto, os problemas podem ser resolvidos com a proposição de modelos de otimização que são aplicados em diversas situações, podendo citar como exemplos: determinação de *mix* de produtos, escalonamento de produção, roteamento de logística,

planejamento financeiro, carteiras de investimento, análise de projetos, alocação de recursos de mídia, designação de equipe (LACHTERMARCHER, 2009).

Nesse âmbito, é possível perceber que existem vários tipos de problemas delimitados por recursos. Sendo assim, torna-se essencial a implantação de métodos de otimização para ser obtida a melhor solução através do conceito de região viável e otimalidade.

2.5. Otimização

Os problemas de otimização são descritos por circunstâncias nas quais se pretende maximizar ou minimizar uma função numérica dependente de várias variáveis em uma situação em que podem existir restrições. Tanto as funções como as restrições, dependem dos valores admitidos pelas variáveis ao longo do processo de otimização. Esse tipo de problema é aplicado em diversas áreas, como em problemas de otimização de estruturas, controle de sistemas dinâmicos, planejamento e análise de operações.

As técnicas de otimização foram inseridas na Segunda Guerra Mundial para a solução de problemas logísticos militares. Nessa época, o professor George B. Dantzig, um dos pioneiros nessa ciência, trabalhava para a força aérea dos Estados Unidos com o intuito de solucionar problemas de alocação de aeronaves usadas no transporte de suprimentos. Foi em 1947 que Dantzig criou o método Simplex para a resolução de problemas de programação linear (ROSAL, 2007).

A aplicação da otimização traz vantagens como a diminuição do tempo dedicado ao projeto, a possibilidade de tratamento simultâneo de um grande número de variáveis e restrições que são de difícil visualização gráfica ou tabular, possibilita a obtenção de soluções não tradicionais e menores custos.

Há mais de um século são conhecidas as técnicas de otimização que vêm sendo usadas nos mais diferentes campos, como de engenharia e de outras ciências. A modernização dos recursos computacionais que foram desenvolvidos nos últimos anos tem proporcionado um grande avanço dessas técnicas, associadas ao fato de que os problemas se tornaram mais complexos.

Assim como vantagens, esses tipos de técnicas também possuem desvantagens, devido a dificuldades numéricas e problemas de robustez relacionados com a falta de continuidade das funções a serem otimizadas ou restrições, funções não convexas, multimodalidade, existência de ruídos nas funções, necessidade de se trabalhar com

valores discretos para as variáveis, existência de mínimos e máximos locais, entre outros (SCHWEFEL; TAYLOR, 1994).

Existem vários métodos de otimização e cada um deles atinge o melhor resultado em um determinado tipo de problema, portanto, a designação do método, submete-se a uma série de características do problema a ser melhorado, onde, muitas vezes é de difícil definição. Faz-se necessário também, um bom conhecimento das ferramentas de otimização.

De acordo com as características dos problemas, podem-se dividir os modelos de otimização em dois grandes grupos: programação linear e programação não-linear.

A seleção do método que será empregado para a resolução do problema de otimização necessita-se, principalmente, da razão entre a qualidade da solução fornecida pelo método e o tempo gasto para encontrá-la. Nesse grau, a maior parte dos problemas é intratável, isto é, são problemas para os quais é improvável que seja possível desenvolver um algoritmo exato que possa ser cumprido em tempo razoável.

Atualmente, as linhas de pesquisa têm experimentado um vasto crescimento e extensa diversidade de técnicas de otimização empregadas a partir de métodos matemáticos tradicionais como programação linear e não linear, programação dinâmica, multiplicadores lagrangianos ou elementos finitos, desenvolvendo novos métodos para solucionar problemas de limitações, como: os métodos estatísticos - regressão estatística, teoria dos conjuntos fuzzy, método de Taguchi ou metodologia de projeto de superfície de resposta e algoritmos não-tradicionais; - algoritmos de bio-inspiração, redes de neurônios artificiais, que estão sendo altamente empregados em trabalhos acadêmicos (ALVAREZ, BARCENA, GONZALEZ, 2016).

Portanto, as técnicas de otimização e algoritmos, destinam-se a estruturar e solucionar os modelos quantitativos que podem ser expressos matematicamente, objetivando-se determinar as melhores condições de funcionamento para os sistemas representados.

Como meio de aprofundamento no assunto, faz-se necessário abordar a respeito da otimização aplicada na sustentabilidade, para que seja reforçada a utilidade neste trabalho.

2.5.1. Otimização na Sustentabilidade

Uma variedade de técnicas para otimização está presente na literatura, desde algoritmos de um número finito de etapas até métodos iterativos que convergem para uma solução, e heurísticas que fornecem soluções mais aproximadas (LOUCKS *et al*., 2005).

Em particular, as abordagens de otimização mais amplas integram a estrutura clássica de três domínios da sustentabilidade (isto é, economia, meio ambiente e sociedade) que se tornaram importantes nos compromissos internacionais para agricultura sustentável (SICHE, 1987).

Os cenários alternativos para o crescimento da sustentabilidade podem ser detectados resolvendo problemas de otimização. Esses tipos de problemas em sustentabilidade, quando formulados, são projetados para atingir o melhor desempenho sustentável sob uma série de restrições de sistema, investimentos e outras restrições relevantes (LIU; HUANG, 2015).

A otimização inclui um conjunto de atividades de melhoria contínua que podem oferecer a melhor solução ajustando um ou mais parâmetros (afetando o comportamento dos mesmos). Estes padrões são obtidos modelando e simulando um sistema. No que diz respeito às operações de produção sustentável, qualquer parâmetro relevante para o processo pode ser selecionado para melhoria da eficiência (desempenho econômico, ambiental ou social). No entanto, será necessário selecioná-los adequadamente e limitar o escopo da solução, uma vez que a melhoria em qualquer uma das três dimensões sustentáveis pode afetar as outras duas, negativa ou positivamente (ALVAREZ, BARCENA E GONZAGUES, 2016).

Comumente, a otimização econômica é tida como um dos objetivos mais populares nas abordagens de modelagem. Todavia, no que tange à otimização da sustentabilidade, deve-se ter como referência os modelos que apresentem os três pilares: econômico, ambiental e social (GHADERI, 2016).

Na literatura são encontrados poucos modelos que incorporam as dimensões econômicas e sociais juntamente com as dimensões ambientais. Quanto aos aspectos econômicos, os critérios de desempenho financeiro como custo, lucro ou valor presente líquido (VPL) foram considerados em muitos trabalhos (BOUKHERROUB *et al*., 2015).

Desse modo, é necessário desenvolver modelos utilizando as três dimensões para a efetivação da otimização da sustentabilidade. Para tanto, as soluções ótimas geralmente são determinadas para alcançar o nível mais elevado de melhoria da sustentabilidade, mantendo-se no limite das restrições escolhidas (LIU; HUANG, 2015). Para uma abordagem detalhada sobre uma das temáticas abordadas neste trabalho, a seção a seguir trata da otimização na sustentabilidade aplicada em agroecossistemas.

2.5.1.1. Otimização na Sustentabilidade em Agroecossistemas

O emprego de modelos de otimização é geralmente utilizado para examinar os efeitos que se desenvolvem em ampla visão de fenômenos, tais como no tocante às mudanças no uso das terras, emissão de poluentes, mudanças climáticas, modificações nos canais fluviais, uso de produtos químicos na agricultura, manejo de bacias hidrográficas e deposição ácida (CRISTOFOLETTI, 1999).

Percebe-se que a incerteza associada a problemas de sustentabilidade é frequentemente difundida, e isso se deve às informações incompletas ou imprecisas e à falta de conhecimento profundo sobre as interações das unidades produtivas dentro do sistema ou com o meio externo envolvido (LIU; HUANG, 2015).

Normalmente são encontradas como função objetivo dos problemas de modelagem matemática, benefícios socioeconômicos de matéria-prima para os produtores e comunidades locais, a redução de gases de efeito estufa, a maximização do retorno econômico para os investidores, etc (GARBIE, 2015).

Recentemente, algumas abordagens de modelagem relativamente simples são usadas no meio rural e estão se tornando disponíveis para o manejo de agricultura, agropecuária e dinâmica da matéria orgânica do solo (GROOT *et al*., 2012).

Cabe salientar que a forma como um modelo é concebido pode ajudar os agricultores na sua tomada de decisão influenciando o modo como a solução é compreendida e percebida por eles (SEMPORE *et al.,* 2015).

A abordagem de otimização pode ajudar os agricultores a utilizar eficientemente os recursos disponíveis, incluindo área de plantio, tempo e dinheiro. A abordagem combina a agricultura com a tecnologia para otimizar a produção agrícola, apoiar o planejamento eficiente e ajudar os agricultores a determinar a possível combinação de culturas para plantar na mesma área agrícola ano a ano.

As técnicas de otimização podem, efetivamente apoiar o desenho de um agroecossistema considerando tanto seus componentes estruturais quanto funcionais (por exemplo, composição de espécies, solo e ciclos de água e nutrientes) como contemplado pelo quadro de serviços ecossistêmicos (MA, 2005; TEEB, 2010) e pela abordagem agroecológica (ALTIERI, 1999; BONAUDO *et al*., 2014; WEZEL *et al*., 2014; FAO, 2014; HATT *et al*., 2018).

Sendo assim, é possível verificar que a modelagem matemática empregada para a sustentabilidade em agroecossistemas, busca solucionar questões ambientais, sociais e econômicas, primordiais para a preservação da estabilidade e o equilíbrio do sistema, evitando ou reduzindo as alterações climáticas, a desertificação, a falta de água, o consumo de energia, de agrotóxicos e fertilizantes, os altos custos, a perda de produtividade, entre outras consequências que a exploração da terra proporciona.

Nessa perspectiva, a otimização da sustentabilidade em agroecossistemas, deve-se utilizar modelos matemáticos que tenham como variáveis as dimensões da sustentabilidade de forma que interajam no processo e consiga encontrar soluções ótimas para o problema. Desse modo, é pertinente mostrar o método que será empregado neste trabalho, para que se tenha um conhecimento mais profundo.

2.5.2. Otimização Multiobjetivo

A maior parte dos problemas reais encontrados na área de otimização envolve a obtenção de diversas metas que devem ser atingidas simultaneamente. Elas geralmente são conflitantes, ou seja, não existe uma solução única que otimize todas ao mesmo tempo. Para tal classe de problemas devemos buscar um conjunto de soluções eficientes (TICONA, 2003). Problemas dessa natureza são chamados de problemas de otimização multiobjetivo por envolverem minimização (ou maximização) simultânea de um conjunto de objetivos satisfazendo a um conjunto de restrições.

Neste caso, a tomada de decisão será de responsabilidade do analista, que deverá ponderar os objetivos globais do problema e escolher uma entre as soluções do conjunto de soluções eficientes (ARROYO, 2002). Isso faz com que o conceito de otimalidade utilizado em otimização mono-objetivo não possa ser utilizado.

Assim, em otimização multiobjetivo, o conceito de otimalidade se baseia na noção introduzida por Francis Ysidro Edgeworth em 1881 (EDGEWORTH, 1881) e

depois generalizada por Vilfredo Pareto em 1896 (PARETO, 1896). Chamando o conjunto de soluções como Edgeworth-Pareto ótimo ou, simplesmente, Pareto-ótimo.

As raízes das técnicas de Otimização Multiobjetivo remontam aos estudos no campo da economia do final do século XIX e início do século XX, período em que estão situados, por exemplo, os trabalhos de Vilfredo Pareto na área (COELLO; LAMONT; VELDHUIZEN, 2007). Contudo, foram nas décadas de 50 e 60 do século XX que a OM avança em termos de desenvolvimento matemático e aplicação, em especial na economia, pesquisa operacional e psicologia (COHON, 2003).

Um problema de otimização multiobjetivo é composto por um conjunto de funções-objetivo a serem otimizadas (maximizadas ou minimizadas) e um conjunto de restrições que devem ser satisfeitas para que a solução seja factível. Supondo a existência de N_{Obj} funções-objetivo que formam o vetor $f(x) = \left[f_1(x), f_2(x), \dots, f_{Nobj}(x)^T\right]$, o problema pode ser formulado como:

$$\begin{gathered} minimizar/maximizar\ f(x) \\ restrita\ a\ g_j(x) \geq 0, j = 1, \dots, J; \\ h_k(x) = 0, k = 1, \dots, K; \\ x_i^{(\inf)} \leq x_i \leq x_i^{(sup)} \end{gathered} \qquad (1)$$

onde x é um vetor de N variáveis de decisão tal que $x = [x_1, x_2, \dots, x_{Nvar}]^T$, representando a solução do problema e J e K são, respectivamente, o número de restrições de desigualdade e de igualdade. As funções (g_j) e (h_k) são chamadas funções de restrição e os valores $x_i^{(\inf)}$e $x_i^{(\sup)}$ representam os limites inferior e superior para a variável x_i. Esses limites definem o espaço das variáveis. O conjunto de todas as soluções factíveis forma a região factível ou espaço de busca. O vetor de funções-objetivo $f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_{Nobj}(x)]^T$ pertencem ao espaço dos objetivos. Para cada solução x no espaço de decisão, existe um ponto $f(x)$ no espaço dos objetivos.

A maior dificuldade inerente aos problemas de otimização multiobjetivo é a existência de objetivos conflitantes. Isto significa que nenhuma das soluções factíveis otimiza simultaneamente todos os objetivos. As soluções ótimas para cada objetivo são, geralmente, diferentes e não satisfazem as necessidades do decisor. Este pode precisar de soluções que satisfaçam certas características com relação aos objetivos considerados.

De acordo com Pereira (2004), à medida que se aumenta o número de objetivos a serem otimizados, e também ponderados os objetivos menos “bem-comportados”, o problema de buscar uma solução pareto-ótima se torna complexo de forma rápida e progressiva.

Um problema de otimização multiobjetivo pode ser resolvido de uma maneira similar a um problema mono-objetivo. Em um problema mono-objetivo, a ideia é encontrar um grupo de valores para as variáveis de decisão, que, sujeitas a um conjunto de restrições, resulta um valor ótimo para a função-objetivo. Já em problemas multiobjetivo, procura-se encontrar valores para as variáveis de decisão que otimizem um grupo de soluções.

Existe uma diferença fundamental entre otimização de um único objetivo e multiobjetivo que não pode ser ignorada: para objetivos conflitantes, cada objetivo corresponde a uma solução ótima diferente. Assim, para se ter maior êxito em um objetivo, tem-se muitas vezes que sacrificar outros. Por isso que, na otimização multiobjetivo, o número de soluções ótimas aumenta por causa da negociação entre os objetivos conflitantes (OLIVEIRA, 2005).

Não existem métodos universais capazes de resolver com eficácia todos os problemas de otimização. Alguns métodos indicados para uma classe ou solução de determinados problemas, podem não ter bom desempenho em outras aplicações (OLIVEIRA, 2005).

Existem três técnicas para solucionar problemas multiobjetivos: (a) priorizar somente aquele objetivo que é considerado prioritário; (b) utilizar agregação ponderada de objetivos definindo um peso para cada objetivo; e, (c) aplicar algoritmos de busca multiobjetivos a fim de encontrar conjuntos de soluções não dominadas.

Além da técnica de otimização multiobjetivo, existem três diferentes formas de interação com o usuário: antes, durante ou depois do processo de otimização. A primeira forma ocorre quando o usuário fornece informações preliminares que serão utilizadas no processo de otimização. A segunda forma ocorre quando o usuário interage durante o processo de otimização, seja para avaliar e/ou editar soluções geradas, as quais serão utilizadas na próxima iteração do processo de otimização. Na última forma, o usuário interage após o processo de otimização quando, ao receber as soluções retornadas do algoritmo, seleciona uma das soluções para ser utilizada.

A seção seguinte apresenta os métodos encontrados na literatura enfocando nas formas de utilização das informações do tomador de decisão e do analista, trazendo uma descrição mais detalhada dos métodos de escalarização, da Ponderação, da $\varepsilon-$Restrição, Híbrido e das Métricas Ponderadas, este último foi o método empregado neste trabalho.

2.5.2.1. Métodos de Escalarização

Diante das considerações feitas anteriormente para caracterizar tanto essa classe de problemas de otimização quanto as suas candidatas à solução. O próximo estágio a ser desenvolvido refere-se a escolha, dentre todas as soluções eficientes ou Pareto-ótimas, aquela que atenda a todos os objetivos conflitantes que definem o problema simultaneamente. Essa escolha final é desempenhada por um novo elemento incorporado ao problema de otimização - o tomador de decisão ou um grupo de tomadores de decisão.

Os métodos de solução próprios para problemas de otimização multiobjetivo são classificados de acordo com o papel do decisor no processo de definição da melhor solução. Em alguns métodos, várias hipóteses são feitas sobre a estrutura de preferências e o comportamento do tomador de decisão. Entretanto, pode ser difícil para o tomador de decisão, distinguir qual a solução ótima para o problema (MIETTNEN, 1999).

A proposta comum a todos os métodos encontrados para problemas de otimização multiobjetivo não linear é a utilização da escalarização, que consiste em converter o problema com vários objetivos em um problema contendo apenas uma única função objetivo ou em uma família de problemas, cada um com uma única função objetivo, gerando uma função denominada de função escalarizante, que dependerá de alguns parâmetros. Mas também permitirá, a partir de então, o uso da teoria e dos métodos de otimização para uma única função objetivo, ou seja, da programação não-linear, e mais especificamente da programação geométrica.

Como a função escalarizante depende de parâmetros provenientes do próprio processo de escalarização, uma fragilidade associada a técnica pode referir-se à geração de soluções viáveis em apenas alguns dos parâmetros ou que o problema de único objetivo não possa ser solucionado em todos os parâmetros.

Miettinen (1999) propôs três requisitos para as funções escalarizantes, os quais não tem incorporada em sua formulação as preferências do tomador de decisão.

(i) A função escalarizante pode cobrir qualquer solução eficiente (ou Pareto-ótima).

(ii) Toda solução é eficiente.

(iii) Caso a função escalarizante incorpore as preferências, isto é, os níveis de aspiração do tomador de decisão, então: sua solução é satisfeita se os níveis de aspiração utilizados são viáveis.

Não existe função escalarizante que satisfaça os três requisitos simultaneamente. É importante mencionar também que os processos que geram soluções para problemas de otimização de único objetivo encontram soluções locais ótimas. Quando a função objetivo é convexa, garante-se que toda solução ótima local é também ótima global. Mas, caso essa hipótese não seja satisfeita, não há garantias da existência de ótimos globais.

Assim, as soluções obtidas quando se utiliza a função escalarizante em problemas de otimização multiobjetivo são ótimos locais de Pareto. Estendendo o conceito de convexidade para o caso multiobjetivo garante-se a otimalidade global de Pareto quando todas as componentes da função vetorial são convexas e a região factível também for convexa. As classificações apresentadas para os métodos de otimização multiobjetivo seguem de Miettnen (1999) e de Cohon (1978).

A classificação utilizada em Miettinen (1999) é feita da seguinte forma:

(1) Métodos não-preferenciais: que não incorporam as informações de preferências do decisor. Neste caso, o tomador de decisão poderá aceitar ou não a solução apresentada pelo método.

(2) Métodos preferenciais: que são divididos em três subgrupos.

a) Métodos *a posteriori*: que geram soluções Pareto-ótimas, mas que em um momento seguinte, tal conjunto de soluções é apresentado ao decisor que deverá selecionar aquela que for mais conveniente.

Esses métodos fazem uso de *softwares* computacionais, geralmente caros e difíceis de manipular para gerar tais soluções, e que não incorporam com facilidade uma melhor forma de apresentar ao decisor as alternativas de solução encontradas.

b) Métodos *a priori*: utilizam as preferências, as expectativas e as opiniões do tomador de decisão traduzidas em informações antes da execução do processo de obtenção de solução.

c) Métodos iterativos: neste método o decisor está envolvido em todo o processo de obtenção de solução juntamente com um analista (que pode ser o indivíduo que opera o *software* iterativo construído ou o próprio *software* computacional). Neste método, apenas algumas soluções Pareto-ótimas são geradas e avaliadas e o decisor pode, então, especificar e corrigir as suas preferencias diante dos resultados apresentados dentro do processo de solução de forma contínua, sem a necessidade de conhecer toda a estrutura de preferências global.

Não serão descritos todos os métodos propostos por Miettinen (1999), apenas alguns métodos *a posteriori* que estão relacionados ao Método das Métricas Ponderadas que será utilizado diretamente na transformação do problema monobjetivo.

2.5.2.2. Método da Ponderação

Este método associa a cada função objetivo um coeficiente de ponderação (ou peso) e minimiza a soma do produto dos pesos pelas funções componentes da função objetivo $F \subseteq \Omega: R^n \rightarrow R^k$. Assim, o problema escalarizado é definido da seguinte forma.

Seja $W = \{w | w \in R^k, w_i \geq 0, \sum_{i=1}^{k} w_i = 1\}$ o conjunto dos pesos não negativos. O problema da ponderação é definido para algum $w \in W$ como $P(w)$ e tem a seguinte formulação:

$$Minimize \ \sum_{i=1}^{k} w_i f_i(x) \ (2)$$

$$sujeito \ a \ w \in \Omega$$

A principal qualidade desse método é a simplicidade e a garantia de obtenção de soluções Pareto-ótimas quando os coeficientes de ponderação forem positivos ou se a unicidade de solução para o problema ponderado for garantida.

Sampaio (2011) e Miettinen (1999) explicitam algumas limitações próprias desse método, tais como não se ter garantias de uma boa área de cobertura para a fronteira eficiente. Além disso, a mudança no valor dos pesos gera um alto custo computacional associado à resolução de um problema de programação não-linear sempre que for necessário encontrar uma nova solução eficiente, pois o problema tem que ser resolvido novamente. E, se a região viável do problema for não convexa, o

método não é eficaz para encontrar soluções em partes não-convexas da fronteira eficiente no espaço objetivo, o mesmo podendo ocorrer com funções objetivo descontínuas.

2.5.2.3. Método das $\mathcal{E}$ − Restrições

Este método seleciona uma das funções objetivo $f_i: \Omega \subseteq \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}, i = 1, \dots, k$ componente da função vetorial $F \subseteq \Omega: \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^m$ para ser otimizada (minimizada) e todas as outras funções objetivo são convertidas em restrições, onde cada uma delas e limitada superiormente por componentes do vetor $\mathcal{E} \epsilon \mathbb{R}^k$.

$$Minimize\ f_i(x)$$
$$sujeito\ a\ f_i(x) \leq \varepsilon_j, \forall_j = 1, \dots, k, j \neq i \quad (3)$$
$$w \in \Omega$$

Esse método também utiliza uma forma simples para converter o problema multiobjetivo para único objetivo. Comparado ao método da ponderação, pode-se dizer que o método da ε−restrição é mais eficaz no sentido de controle da cobertura da fronteira eficiente. Entretanto, este também é um método limitado em si, pois é necessário resolver um problema de programação não-linear sempre que for necessário obter uma nova solução eficiente. O método também é sensível à escolha do vetor $\mathcal{E} \epsilon \mathbb{R}^k$, cuja tarefa não é trivial e a dificuldade aumenta à medida que a quantidade de componentes objetivo do vetor $F = (f_1, f_2, \dots, f_k)$ também aumenta (SAMPAIO, 2011).

2.5.2.4. Método das Métricas Ponderadas

De acordo com Miettinen (1999), Chakong e Haimes (2008) e Ehrgott (2005), o método das métricas ponderadas é um método que não incorpora preferências e que faz uso de pesos associados as métricas *Lp* para $1 \leq p < \infty$ e $L\infty$ buscando gerar diferentes soluções Pareto-ótimas de acordo com a escolha dos pesos associados ao problema.

Seja $W = \{w | w \in R^k, w_i \geq 0, \sum_{i=1}^{k} w_i = 1\}$ o conjunto dos pesos não negativos. Diferentes soluções são obtidas quando se altera os coeficientes de ponderação *wi* para *i* = 1, · · ·, *k* que estão associados às distancias entre as funções componentes $f_i: \Omega \subseteq \mathbb{R}^m \to \mathbb{R}$ e os seus respectivos vetores objetivo ideais na métrica *Lp*, $1 \leq p \leq \infty$, onde um vetor objetivo ideal é definido por: $z_i^* = f_i(x_i)$ com

$$x_i \coloneqq \arg min_{x \in \Omega \subseteq \mathbb{R}^n} f_i(x), i = 1, \dots, k.$$

O problema das métricas ponderadas é definido para $w \in W$ com a seguinte notação P (w, p), *com* $1 \leq p < \infty$ e tem a seguinte formulação:

$$Minimize \left(\sum_{i=1}^{k} w_i |f_i(x) - z_i^*|^p\right)^{\frac{1}{p}} \quad (4)$$

$$sujeito\ a\ x \in \Omega$$

Quando $p = \infty$ o problema resultante $P(w, \infty)$ é denominado como problema-$L\infty$ ou como problema de Tchebycheff e é formulado por:

$$Minimize\ max\ _{i=1,\ldots,k} \{w_i |f_i(x) - z_i^*|\} \quad (5)$$

$$sujeito\ a\ x \in \Omega$$

Além disso, no problema $P(w, \infty)$ em (5) o sinal de valor absoluto pode ser eliminado em virtude da definição do vetor objetivo ideal, se ele é conhecido globalmente. De acordo com Miettinen (1999), o problema de Tchebycheff não é diferenciável e uma forma de torná-lo diferenciável é considerando uma nova variável φ, já que tanto as componentes da função objetivo, $f_i: \Omega \subseteq \mathbb{R}^m \longrightarrow \mathbb{R}$, para $i = 1, \ldots, k$, quanto o conjunto de viabilidade do problema são diferenciáveis e z^* é determinado completamente. Assim, para $x \in \mathbb{R}^n$e $\varphi \in \mathbb{R}$ variáveis de decisão, obtém-se o seguinte problema diferenciável.

$$Minimize\ \varphi$$

$$sujeito\ a\ w_i(f_i(x) - z_i^*) \leq \varphi, \forall_i = 1, \ldots, k \quad (6)$$

$$x \in \Omega$$

2.6. Programação Geométrica

A Programação Geométrica (PG) é um dos ramos da programação matemática que procura minimizar uma função de custo que pode ser vista como um polinômio generalizado que consiste em uma soma de termos onde cada termo é um produto de uma constante positiva e das variáveis do modelo elevados a potências arbitrárias (NASCIMENTO, 1996).

A Programação Geométrica é uma técnica de otimização frequentemente utilizada na solução de uma classe de problemas de programação não linear, especialmente comuns às áreas da engenharia de planejamento e da produção industrial (LIMA JR, NASCIMENTO, 2006).

Essa técnica tem sua origem em 1961, quando C. Zener e Richard Duffin estudaram o problema de otimizar polinômios generalizados. Com o objetivo de

determinar condições de otimalidade e propriedades das soluções ótimas eles utilizaram desigualdades ao invés da abordagem clássica das condições de Otimalidade de *Karush-Kuhn-Tucker*. Uma das desigualdades usadas em seus estudos foi a clássica desigualdade entre a média aritmética e a média geométrica, dando origem ao termo Programação Geométrica (NASCIMENTO, 1996).

A base desta técnica de minimização é encontrada nas propriedades da desigualdade clássica da métrica aritmética-geométrica, que fornece o mínimo do problema dual correspondente, caracterizado por ter restrições lineares. O valor ideal para este problema corresponde ao melhor valor primal (ALUEVA; PPEREZ, 1992).

A técnica de programação geométrica resolve problemas não lineares como aqueles que tanto a função objetivo e as restrições são expressões posinomiais com coeficientes positivos.

O desenvolvimento matemático da Programação Geométrica está baseado na relação de desigualdade entre somatórios e produtórios de números positivos. Sendo também conhecido como Programação Posinomial. Nesse sentido, a programação geométrica ocorre devido ao relacionamento existente entre as médias geométrica e aritmética, as quais são fundamentais na elaboração da teoria de dualidade em problema de otimização, cujas aplicações são vastas em problemas de engenharia (NASCIMENTO, 1996).

Cabe destacar que os algoritmos de programação geométrica têm sido constantemente melhorados, sendo considerados como ferramentas poderosas para a resolução de problemas algébricos de programação não-linear.

De acordo com Lima Jr e Nascimento (2006), teoricamente, o método da Programação Geométrica tem por fundamento uma desigualdade que relaciona as médias aritmética e geométrica, de modo que, para quais quer números positivos $x_1, x_2 \dots x_n$ e para qualquer conjunto de pesos positivos $w_1, w_2 \dots w_n$ tais que $w_1 + w_2 + \cdots + w_n = 1$ (Condição de Normalidade), tem-se

$$w_1 x_1 + w_2 x_2 + \cdots + w_n x_n \geq x_1^{w_1} x_2^{w_2} \dots x_n^{w_n}$$

Ou

$$x_1 + x_2 + \cdots + x_n \geq \left(\frac{x_1}{w_1}\right)^{w_1} \left(\frac{x_2}{w_2}\right)^{w_2} \dots \left(\frac{x_n}{w_n}\right)^{w_n}$$

Um *posinômio* é uma função composta por termos da forma $c_i \prod_j^m = 1 t_j^{aij}$, onde asconstantes c_i são positivas e os expoentes a_{ij} são números reais. Se for admitida a possibilidade dos coeficientes c_i serem negativos, então a função passa a ser denominada de *signômio* (BEIGHTLER, 1976).

Genericamente, tem-se que

$$\begin{gathered} Minimize\ f(t) \\ sujeita\ a \\ g_k(t) \leq 1, k = 1, \dots, p, \quad (7) \\ t > 0, \end{gathered}$$

representa um Problema de Programação Geométrica (PPG), que será classificado como *posinomial*, se as funções f e $g_k, k = 1, \dots, p$, forem posinômios, e como *signomial*, se alguma dessas funções for um signômio.

2.6.1. O problema Primal de Programação Geométrica Posinomial

O problema primal de programação geométrica posinomial é escrito na forma

$$\begin{gathered} minimizar\ g_0(t) \\ sujeito\ a\ g_k(t) \leq 1, k = 1, \dots, p, t > 0 \quad (8) \end{gathered}$$

onde $g(t) = \sum_{i \epsilon J|K|} c_i \prod_{j=1}^m t_j^{a_{ij}}$, com $J[k] = \{m_k, m_k + 1, m_k + 2, \dots, n_k\}, k = 1, \dots, p, m_o = 1, m_1 = n_o + 1, \dots, n_p = n,$ sendo as constantes c_i positivas e os expoentes a_{ij} números reais.

2.6.2. O problema dual de programação geométrica posinomial

Associado ao problema primal de programação geométrica posinomial, tem-se o respectivo dual, expresso nos seguintes termos:

$$\begin{gathered} maximizar\ v(\delta, \lambda) = \prod_{k=1}^{p} \left\{ \lambda_k^{\lambda_k} \prod_{i \epsilon J|k|} \left(\frac{c_i}{\delta_i} \right)^{\delta_i} \right\} \\ sujeito\ a\ \lambda_0 = 1, \delta_1 \geq 0, \quad (9) \\ \sum_{i=1}^{m} a_{ij} \delta_i = 0, j = 1, \dots, m. \end{gathered}$$

Convém observar que apesar de a função dual v não ser côncova, a função $f(\delta) = \ln(v(\delta)) = \sum_{i=1}^{n} \{\delta_i, \ln(c_i) - \delta_i ln \delta_i\} + \sum_{k=1}^{p} \left(\sum_{i \epsilon J|k|} \delta_i \right) ln \left(\sum_{i \epsilon J|k|} \delta_i \right)$ possui tal característica.

Finalmente, importa destacar que as variáveis primais e duais de um PPG vinculam-se por meio da relação

$$\delta_i, g_k(t) = \lambda_k c_i \prod\prod_{j=1}^{m} t_j^{a_{ij}} i \, \epsilon \, J[k].$$

2.6.3. O problema primal de programação geométrica signomial

O problema primal de programação geométrica signomial vem a ser uma generalização do problema primal para o caso posinomial, sendo proposto na forma

$$minimizar \; g_0(t)$$

$$sujeito \; a \; g_k(t) \leq 1, k = 1, \dots, p, (10)$$

onde $g_k(t) = \sum_{i \epsilon J|k|} \sigma_i c_i \prod_{j=1}^{m} t_j^{a_{ij}}$, com $J[k] = \{m_k, m_k + 1, m_k + 2, \dots, n_k\}$, $k = 1, \dots, p, m_0 = 1, m_1 = n_0 + 1, \dots, n_p = n,$ as constantes c_i são positivas, os a_{ij} são números reais e $\sigma_i = \pm 1$.

2.6.4. Condensação em programação geométrica signomial

A técnica mais comumente utilizada na resolução do problema primal de programação geométrica signomial é a denominada de condensação, a qual, em essência, consiste na aproximação de termos constituídos por vários posinômios, ou seja, termos do tipo

$$\sum_{i \epsilon J|k|} \sigma_i c_i \prod_{j=1}^{m} t_j^{a_{ij}}, (11)$$

por um único da forma $\prod_{j=1}^{m} t_j^{a_{ij}}$. Para isso, faz-se uso da desigualdade $\sum_{i \epsilon J|k|} c_i \prod_{j=1}^{m} t_j^{a_{ij}} \geq \sum_{i \epsilon J|k|} \left(\frac{c_i \prod_{j=1}^{m} t_j^{a_{ij}}}{w_i} \right)^{w_i}$, onde $\sum_{i \epsilon J|k|} w_i = 1$, em relação a qual igualdade ocorre, se

$$w_i = \frac{c_i \prod_{j=1}^{m} t_j^{a_{ij}}}{\sum_{i \epsilon J|k|} c_i \prod_{j=1}^{m} t_j^{a_{ij}}} \; (12)$$

Observando-se que uma restrição de natureza signomial pode ser expressa como uma diferença do tipo

$$P_k(t) - Q_k(t), (13)$$

onde $P_k(t)$ e $Q_k(t)$ são termos posinomiais, e usando-se a desigualdade (a segunda desse topico), é possível reescrever a restrição $g_k(t) \leq 1$ na forma

$$\frac{P_k(t)}{1 + Q_k(t)} \leq \frac{P_k(t)}{S_i}, (14)$$

com $S_i = \prod_{i \epsilon J \mid K \mid} \left(\frac{u_i(t)}{w_i}\right)^{w_i}$ e $w_i = \frac{u_i(t')}{1+Q_k(t')}$

Nesse contexto, o parâmetro t' recebe a denominação de ponto de referência. Desde que S_i resume-se a um único termo posinomial, tem-se que a restrição $g_k(t) \leq 1$, $g_k(t) = P_k(t) - Q_k(t)$, é agora, também, de natureza posinomial.

Outro tipo de restrição que pode ser transformado em restrições do tipo $g_k(t) \leq 1$, são restrições reversas, isto é, restrições do tipo: $g_k(t) \geq 1$ com $g_k(t)$ sendo uma função signomial, pois

$$g_k(t) \geq 1 \Leftrightarrow \frac{1}{g_k(t)} \leq 1 \quad (15)$$

Portanto,

$$\frac{1}{\sum_{i \epsilon J \mid k \mid} c_i \prod_{j=1}^{m} t_j^{a_{ij}}} \leq \sum_{i \epsilon J \mid k \mid} \left(\frac{c_i \prod_{j=1}^{m} t_j^{a_{ij}}}{w_i}\right)^{-w_i}, \quad (16)$$

Esta desigualdade resulta da desigualdade entre a média aritmética e a média geométrica. Outra desigualdade que pode ser usada para fazer esse tipo de transformação é a desigualdade entre a média Harmônica e a média aritmética:

$$x_1 + x_2 + \cdots + x_n \geq \frac{1}{\frac{{w_1}^2}{x_1} + \frac{{w_2}^2}{x_2} + \cdots + \frac{{w_n}^2}{x_n}} \quad (17)$$

A qual aplicada à restrição $g_k(t) \geq 1$ resulta em

$$\frac{1}{\sum_{i \epsilon J \mid k \mid} c_i \prod_{j=1}^{m} t_j^{a_{ij}}} \leq \sum_{i \epsilon J \mid k \mid} \frac{{w_i}^2}{c_i \prod_{j=1}^{m} t_j^{a_{ij}}} \quad (18)$$

Esse tipo de transformação é menos comum, no entanto ela não altera a matriz de expoente nem o grau do problema.

2.6.5. Um método de solução para o problema de programação geométrica signomial baseado em condensação

Como uma consequência do processo de aproximação, a solução do problema de programação geométrica signomial pode ser obtida por meio do procedimento expresso pelo seguinte algoritmo:

Algoritmo 2

Dados um ponto $t_0 > 0$ *e* $k = 0$,

Enquanto $\left| |t^k - t_0| \right| > \varepsilon$

Passo 1 Condense as restrições signomiais usando t_0 *como um ponto de referência.*

Passo 2 Use o algoritmo 1, para resolver o problema de Programação Geométrica Posinomial encontrado no Passo 1, sendo t^k *sua solução.*

Passo 3 Faça $t_0 = t^k$

$k = k + 1$

Fim do Enquanto.

3. MODELO DE OTIMIZAÇÃO

O modelo de otimização empregado neste trabalho é baseado em programação multiobjetivo que tem como finalidade definir, simultaneamente, uma maior produtividade e maior índice de sustentabilidade dos agroecossistemas, índice este já determinado no trabalho desenvolvido por Rodrigues (2018). Este modelo, portanto, depende das variáveis que se relacionam com indicadores de sustentabilidade bem como com as particularidades físicas dos agroecossistemas estudados.

Sendo assim, foram determinadas todas as informações necessárias a entrada de dados do modelo de otimização. Informações estas que compreendem a utilização adequada de adubo e quantidade de água, monitoramento do consumo de energia e pesticidas, administração dos contratos de trabalho, dos valores comerciais e da diminuição dos custos de produção, características essas vistas como cruciais para a conservação da resiliência e da estabilidade das condições econômicas, sociais e ambientais dos agroecossistemas.

3.1. Dados do Modelo

Este estudo tem como suporte os dados de 4 agroecossistemas estudados por Reis (2013) em sua tese de doutorado que se tratou a respeito de Avaliação de Sustentabilidade de Agroecossistemas de Bananeira Irrigada de formas diferentes de produção moderna e tradicional: o Caso de Ipanguaçu–RN. Considerando que esse trabalho abrange dados a respeito dos indicadores de sustentabilidade alcançados através da implantação do IDS (S3), o modelo corrobora, desse modo, com as informações apropriadas e particularidades do meio onde foi realizada a modelagem matemática.

Desse modo, os dados desse estudo permitiram que fossem determinadas as conexões entre a produção, o manejo, a recuperação, e como mensurar e moldar tais fatos que satisfazem os limiares de sustentabilidade existentes na literatura.

3.1.1. Indicadores de Sustentabilidade

Os indicadores de sustentabilidade em agroecossistemas selecionados com base no instrumento IDS (S3) e nos dados secundários obtidos da tese de Reis (2013), para a construção do modelo matemático são os seguintes:

Quadro 3 - Indicadores de Sustentabilidade em Agroecossistemas

Indicadores Ambientais	**Indicadores Econômicos**	**Indicadores Sociais**
Consumo de água – A1	Produtividade – E1	Emprego direto – S1
Consumo de energia – A2	Confiança econômica – E2	
Uso de Fertilizantes – A3		
Uso de agroquímico – A4		
Área de reserva legal – A5		

Fonte: Adaptado de Reis (2013).

Como expressado no Quadro 2, o estado de sustentabilidade bem como a função de relação negativa e positiva da análise das variáveis foram empregados para a formulação do problema de otimização dos agroecossistemas estudados neste trabalho, desse modo, torna-se indispensável expor as informações encontradas na literatura a respeito da cultura da banana irrigada (Quadro 4).

Quadro 4 - Dados para a cultura de banana irrigada

Recomendações para a produção de banana	**Parâmetros**
A_T - Área total disponível dos agroecossistemas modernos	712,98 (Reis, 2013).
AM = Área do Município correspondente à cultura de banana	800 ha (IBGE, 2018).
AR = Área da Região correspondente à cultura de banana	5191 ha (IBGE, 2018).
α - proporção de reserva legal	20 % (Brasil, 2019).
Fk e Fk - limite inferior e superior para quantidade de fertilizantes k necessários (N - Nitrogênio, P- Fósforo, K - Potássio).	**N -** (fk: 360; FK: 600) **P** - teor do solo 1 (fk: 80, FK: 160); 2 (fk: 60, FK: 120) 3 (fk: 40, FK: 80); **K** - teor do solo 1 (fk: 750, FK: 1200); 2 (fk: 550, FK: 850) 3 (fk: 300, FK: 450). (Borges, 2004).
Prmink e Prmaxk: produção esperada quando aplicada as quantidades fk e Fk	Prmink: 20 kg; Prmaxk: 60 kg (Borges, 2004).
Prfk - Preço dos fertilizantes k (N, K e P)	N (20kg) – R$ 145,00; K (25kg) R$ 225,97; P (20KG) R$ 110,00 (CEASA, 2020).
Aid - quantidade de água considerada sustentável para o cultivo por planta diária	30 l/P/Dia (Borges e Souza, 2004).
Enid - quantidade de energia elétrica considerada sustentável para irrigação diária	3,72 kWh/dia (Alfaro e Marin, 1991).
Nes - número de empregados sindicalizados ou cadastrados como trabalhadores rurais do município	696 (IBGE, 2018).
αs – limite inferior da faixa de sustentabilidade	0,6 (Sepúlveda, 2008).

Preço mínimo e máximo de mercado (22kg) de banana	Precmin: R$ 11,44; Precmax: R$ 16,00 (CEASA, 2020).
Produção de banana em toneladas (Local: 32.000; Regional: 155.014, Nacional: 7 234 262)	Prod min: 32.000t; Prod Max: 7 234 262t (IBGE, 2018).
Ce = custo do kilowatt de energia na zona rural do Rio Grande do Norte	0,42532000 (COSERN, 2019).
Tc = Tempo em dias desde o plantio até a colheita	360 dias (Borges e Souza, 2004).
Potência das bombas utilizadas	½ cv
Napagt = Número de aplicações de agrotóxicos recomendada	10 l/ano (Borges e Souza, 2004).
$Daid = \frac{Napagt}{2}$ = Quantidade considerada sustentável de agrotóxico por hectare ao ano.	0,5 l/ha (Borges e Souza, 2004).
Preço de 1 (um) l do agrotóxico (Tebuconazole/Folicur200 EC) utilizado nos agroecossistemas para combater a sigatoka amarela	R$ 167,00 (Mercado livre, 2018).
Valor do contrato de trabalho na zona rural	2 salários-mínimos (R$ 1996,00)

Fonte: Elaboração Própria (2019).

3.2. Formulação do Problema

Para prosseguir com o desenvolvimento do modelo de otimização, é necessário a determinação das variáveis, expostas no Quadro 5, e dos parâmetros tecnológicos (Quadro 6) para facilitar a linguagem foram determinadas siglas para eles.

Quadro 5 – Descrição da variável e suas siglas

DESCRIÇÃO DA VARIÁVEL	SIGLA
Área beneficiada pelo cultivo (Ha)	Ar
Volume de água consumido (m^3)	Ag
Número de mudas ou plantas (unid)	Np
Produção por planta (unid)	Po
Preço de venda (R$)	Pr
Uso diário de energia (kWh/dia)	E
Número de contratos de trabalho (unid)	Nc
Valor do contrato de trabalho unitário (R$)	V
Quantidade de fertilizantes do tipo k a ser utilizada (kg/Ha)	Ftk
Tempo de utilização da bomba d´água para irrigação (horas)	T
Quantidade de agrotóxicos utilizados (l/Ha)	Agt
Vazão das bombas utilizadas	Va

Fonte: Rodrigues (2018).

Quadro 6 – Descrição dos parâmetros e suas siglas

DESCRIÇÃO DO PARÂMETRO TECNOLÓGICO	SIGLA
Área total disponível no agroecossistema	AT
Proporção de reserva legal	α
Uso ideal da água para a irrigação diária de uma planta ou muda	Aid
Limite inferior e superior para quantidade de fertilizantes k necessários	fk; Fk
Produção esperada quando usada as quantidades fk; Fk do fertilizante k	Prmink; Prmaxk
Preço do fertilizante k	Prfk
Quantidade de energia elétrica considerada ideal para irrigação diária	Enid
Área do município	AM
Número de empregados sindicalizados ou cadastrados como trabalhadores rurais do município	Nes
Fator tempo usado para corrigir a quantidade de água	α_{temp}
Limite inferior da faixa de sustentabilidade	αs
Parâmetro de sustentabilidade - $P = \frac{\log 4}{\log \frac{3}{2}}$	B
$\log \frac{Prmaxk}{Prmink} / log \frac{Fk}{fk}$	Γ
$\frac{\log 4}{\log 2}$	θ
Potência da bomba empregada	Pot
Preço mínimo de comercialização	Precomin
Preço máximo de comercialização	Precomax
Menor produção (local, regional, nacional)	Prodmin
Maior produção (local regional, nacional)	Prodmax
Custo de energia na zona rural	Ce
Tempo desde o plantio até a colheita em dias	Tc
Vazão das bombas utilizadas	Va
Número de aplicações de agrotóxicos recomendado	Napagt
Custo do agrotóxico por litro	Cagt
Número de agrotóxico especulado como sustentável por hectare ao ano.	$Das = \frac{Napagt}{2}$
Número de empregos considerado sustentável Nemp = (A_T/AM) Nes	Nemp
Valor mínimo de um salário mínimo no campo	Vsal
Percentual do valor da produção gasto com custos	PC
Vazão de bomba com potência de ½ cv	Vmerc

Fonte: Rodrigues (2018).

3.2.1. Definição das Restrições

As restrições do problema modelam as limitações dos sistemas produtivos dos agroecossistemas estudados por meio das inequações que condizem com as áreas que a

cultura pode ser semeada, com o uso apropriado da água, o tempo empregado pelo sistema de bombeamento, o gasto de adubo para o alcance da produção esperada, o valor de comercialização, a quantidade de contratos de trabalho e o emprego de pesticidas. Desse modo, as restrições que formam o modelo de otimização da problemática abordada, serão detalhadas a seguir.

- Área Beneficiada pelo Cultivo

A restrição para a área cultivada (Ar) é alcançada como sendo menor ou igual a 1 menos o parâmetro de reserva legal (α = 20 %) vezes a área total disponível no agroecossistema (AT). Portanto:

$$Ar \leq (1 - \alpha) * AT$$

- Consumo da água

Essa restrição é composta pelo volume de água consumido (Ag), número de plantas irrigadas (Np), área beneficiada pelo cultivo (Ar) sendo menor ou igual a vazão das bombas utilizadas (Va) multiplicada pelo tempo de utilização da bomba d´água para irrigação (T).

$$Ag * Np * Ar \leq Va * T$$

$$T \leq 365 \text{ (dias)}$$

- Utilização de energia

Essa restrição depende do uso diário da energia (E) que deve ser maior ou igual a potência da bomba empregada (Pot) sobre 1000 (transformação de W para kW).

$$E \geq \frac{Pot}{1000} * \frac{Va}{Vmerc}$$

- Produção Esperada

Esta restrição, por sua vez, trata-se da quantidade de fertilizantes do tipo k a ser utilizada, compostos por N (Nitrogênio), P (Fósforo) e K (Potássio), sendo esses menores ou iguais a produção por planta (Po) quando usada as quantidades mínimas de Ft_k ($Prmin_k$).

$$Prmin_k * fk^{-\gamma} * {Ft_k}^{\gamma} \leq Po$$

$$0{,}02 \leq Po \leq 0{,}06$$

- Valor comercial

A relação dessa restrição se associa ao preço mínimo (Precomin) e preço máximo (Precomax) de comercialização no mercado, ou seja, o preço de venda (Pr) deve ser maior que o preço mínimo e menor que o preço máximo.

$$Precomin \leq Pr \leq Precomax$$

- Custo do Contrato de Trabalho

Tal restrição é constituída pelo valor do contrato de trabalho unitário (V), valor este que deve ser maior ou igual ao valor de um salário mínimo (Vsal) no campo, e, normalmente, é menor ou igual a duas vezes esse mesmo número.

$$V \geq Vsal$$

$$V \leq 2 * Vsal$$

- Contrato de Trabalho

A restrição do contrato de trabalho é formada pelo número de contratos de trabalho (Nc) que deve ser menor ou igual a área beneficiada pelo cultivo multiplicado pelo número de empregos considerado sustentável (Nemp).

$$Nc \leq Ar * Nemp$$

- Sustentabilidade da água

Trata-se do uso ideal da água para a irrigação diária de uma planta ou muda (Aid). Para tal, utilizou-se o parâmetro de sustentabilidade $\beta=\frac{\log 4}{\log \frac{3}{2}}$, no qual foi considerado que o consumo deve ser inferior a 30 litros de água por dia segundo Borges & Souza (2004).

$$Aid^{-\beta} * Ag^{\beta}$$

$$Ag \geq 0{,}03\ (m^3)$$

- Sustentabilidade da energia

Essa restrição é formada pela quantidade de energia elétrica considerada ideal para irrigação diária (Enid) e o uso diário de energia (E). Este valor deve ser inferior ao parâmetro de 3,72kWh/dia (ALFARO E MARIN, 1991).

$$\mathrm{Enid}^{-\beta} * E^{\beta}$$

$$E \leq 3{,}72(\mathrm{kWh/dia})$$

- Sustentabilidade do emprego de agrotóxicos

A restrição da sustentabilidade dos agrotóxicos é constituída pelo número de agrotóxico especulado como sustentável (Das), por hectare ao ano, e pela quantidade de agrotóxicos utilizados (Agt) que deve ser de 0,5 l/ha (Borges e Souza, 2004).

Quantidade considerada sustentável de agrotóxico por hectare ao ano.

$$(Das)^{\beta} * Agt^{-\beta}$$

- Sustentabilidade da Empregabilidade

Essa restrição se refere ao número de empregos considerado sustentável classificada como sustentável (Nemp) e pelo número de contratos realizados (Nc).

$$Nemp^{-\theta} * Nc^{\theta}$$

- Sustentabilidade do valor de mercado

A restrição da sustentabilidade desse valor é composta pela média aritmética do preço mínimo e máximo sendo como inferior ou igual ao limite ótimo de sustentabilidade.

$$\alpha s * Precomin^{-\beta\beta} * Pr^{\beta\beta} \leq 1$$

- Produção

Esse tipo de restrição se trata da metade do preço da produção, isto é, percentual do valor da produção gasto com custos (PC), preço de venda (Pr), produção por planta (Po), número de plantas (Np) e área beneficiada pelo cultivo(Ar), devendo ser maior ou igual ao percentual da quantidade gasta na produção com seus respectivos custos, ou seja, custos com energia (Ce = custo de energia na zona rural, Tc = tempo desde o plantio até a colheita, E= energia), agrotóxicos (Cagt = Custo do agrotóxico, Agt = quantidade de agrotóxicos utilizados), adubo (Prf_k = Preço do fertilizante k, Ft_k = Quantidade de fertilizantes do tipo k a ser utilizada) e contrato de trabalho (Nc = número de contratos de trabalho, V = valor do contrato de trabalho unitário). Sendo que, esse percentual, produção e custos, não devem ultrapassar 50%. Desse modo, procura-se maximizar os rendimentos produtivos, diminuindo os custos e, ao mesmo tempo, preservar os níveis estáveis de sustentabilidade.

$$(Ce * Tc * E) + (Cagt * Agt) + (Prfk * Ftk) + (Nc * V) \leq PC * Pr * Po * Np * Ar$$

3.2.2. Função Objetivo

Este tipo de função se trata da estruturação real do comportamento de um dado sistema que contém uma função matemática dependente de variáveis de decisão. Por isso, quando o modelo de otimização apresenta uma solução ótima para os agroecossistemas, os valores atingidos pelas variáveis de decisão são os mais compatíveis a estas e que conseguem atender, da melhor forma, as restrições do modelo.

Nesse contexto, pode-se entender que a função objetivo desse estudo está sujeita às expressões restritivas exibidas na seção anterior. Sendo assim, tem-se como finalidade a maximização da produção por muda, preço de venda, número de plantas e

área beneficiada pelo plantio para certificar a maior produtividade e maior índice de sustentabilidade possível dos agroecossistemas, sendo dada por:

$$Max\ \{(Pr * Po * Np * Ar), (Aid^{-\beta} * Ag^{\beta}) + (Enid^{-\beta} * E^{\beta}) + (Das^{-\beta} * Agt^{\beta}) + (Nemp^{-\theta} * Nc^{\theta}) + (\alpha s * Precomin^{-\beta} * Pr^{\beta})\}$$

Sendo assim, a partir do entendimento de todas as variáveis, parâmetros e restrições bem como da função-objetivo, que consiste no modelo de otimização, torna-se indispensável à definição do problema designado para este modelo bem como o índice de sustentabilidade proposto.

3.3. Definição do Problema

Diante da posse de todos os dados necessários ao modelo de otimização desse estudo, isto é, as variáveis, parâmetros, restrições e função objetivo, a modelagem matemática está completa, sendo representada a seguir.

$$Max = \{(Pr * Po * Np * Ar), (Aid^{-\beta} * Ag^{\beta} + Enid^{-\beta} * E^{\beta} + Das^{-\beta} * Agt^{\beta} + Nemp^{-\theta} * Nc^{\theta} + \alpha s * Precomin^{-\beta} * Pr^{\beta})\} \quad (19)$$

Sujeito a:

$$Ar \leq (1 - \alpha) * AT \quad (20)$$

$$Ag * Np * Ar \leq Va * T \quad (21)$$

$$Ag \geq 0{,}03 \quad (22)$$

$$T \leq 24 \quad (23)$$

$$E \geq \frac{PotT}{1000} * \frac{Va}{Vmerc} \quad (24)$$

$$E \leq 3{,}72 \quad (25)$$

$$Prmink * fk^{-\gamma} * Ftk^{\gamma} \leq Po \quad (26)$$

$$0{,}02 \leq Po \leq 0{,}06 \quad (27)$$

$$Precomin \leq Pr \leq Precomax \quad (28)$$

$$V \geq Vsal \quad (29)$$

$$V \geq 2 * Vsal \quad (30)$$

$$Nc \leq Ar * Nemp \quad (31)$$

$$(Ce * Tc * E) + (Cagt * Agt) + (Prfk * Ftk) + (Nc * V) \leq PC * Pr * Po * Np * Ar \quad (32)$$

$$Aid^{-\beta} * Ag^{\beta} + Enid^{-\beta} * E^{\beta} + Das^{-\beta} * Agt^{\beta} + Nemp^{-\theta} * Nc^{\theta} + \alpha s * Precomin^{-\beta} * Pr^{\beta} \leq 5 \quad (33)$$

Na seção a seguir, será exibida como se deu a implementação computacional, haja vista que o modelo de programação empregado como procedimento para a resolução do problema é uma programação geométrica, então, a técnica de resposta exigida para esse tipo de problema ocorre em programas convexos no *software* Matlab.

3.4. Implementação Computacional

Existem algumas ferramentas que ajudam a solucionar os problemas de programação geométrica, contudo, para resolver o tipo de problema de otimização adotado nesse estudo, foi empregado o *toolbox* CVX pertencente ao *software* Matlab, haja vista ser um método bastante usado em otimização convexa.

O Matlab é um espaço computacional usado na aplicação de cálculo numérico, sua estrutura de dados essencial é a matriz, que pode ter elementos reais ou complexos. Além de tudo, existem bibliotecas com funções adicionais, sendo essas, chamadas de *toolboxes*, empregadas para finalidades mais particulares (BREZOLIN, 2015).

Em sua forma padrão, o CVX apoia uma abordagem específica em relação a otimização convexa nomeada de programação convexa disciplinada. Perante esta aplicação, funções convexas e conjuntos são elaborados por meio de um pequeno conjunto de regras em uma análise convexa e de uma biblioteca de suporte das funções e conjuntos convexos. Restrições e objetivos que são expressos utilizando regras que são automaticamente convertidos em um modelo canônico e são resolvidos (BOYD, 2013).

Dessa forma, pode-se entender que os programas geométricos não são convexos, porém, podem ser transformados em convexos empregando-se uma conversão. Para isso, o CVX possibilita que essa categoria de problema seja estabelecida em sua forma inicial, isto é, não convexa, modificando-o automaticamente em um modo convexo solucionável e retornando os resultados numéricos de volta ao problema primário.

Diante da exposição a respeito de como se dá a implantação computacional para que seja atingida a solução do problema estudado, o capítulo seguinte trata dos resultados encontrados bem como as discussões a respeito do índice de sustentabilidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados conseguidos após a implantação do *toolbox* CVX referente ao problema de programação geométrica desse modelo são detalhados neste capítulo. Inicialmente, são exibidas as informações dos 4 agroecossistemas que foram empregados para a validação do modelo. Posteriormente, foram expostos os resultados e feita uma discussão a respeito da solução encontrada.

4.1. Teste do Modelo de Otimização em Agroecossistemas

Para realizar a validação do modelo desenvolvido, 4 agroecossistemas localizados na cidade de Ipanguaçu, no Rio Grande do Norte, foram escolhidos. Os dados obtidos foram captados da tese de Reis (2013). Tais agroecossistemas lidam, com a produção de banana através de irrigação. O Quadro 7 expõe os dados deles.

Quadro 7 - Características dos Agroecossistemas Modernos

ELEMENTOS DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA	AGRO 1	AGRO 2	AGRO 3	AGRO 4
Área Total (Ha)	113,11	150,92	274,39	174,56
Consumo de Água (L/P/Dia)	31	30,70	30,50	38,80
Consumo de Energia (Kwh/Ha/Dia)	4,80	3,60	3,50	3,60
Consumo De Agrotóxico (L/Ha)	0,5	0,5	0,5	0,5
Plantas Por Hectare (P/Ha)	1.850	1.850	1.850	1.850
Produção (Ton)	5.644,19	5.722,89	16.035,35	9.740,45
Produtividade (Ton)	49,90	37,92	58,44	55,40
N° De Contratos (Unid)	182	152	426	190

Fonte: adaptado de Reis (2013).

Diante do que foi apresentado a respeito das particularidades dos agroecossistemas estudados, verifica-se que essas informações são de grande importância para a verificação da viabilidade do resultado obtido pelo modelo de otimização. Dessa maneira, os resultados encontrados para cada um dos agroecossistemas, foram expostos na próxima seção após ter sido realizada a implementação computacional dos dados no Matlab.

4.2. Comparação dos resultados dos modelos

No trabalho de Rodrigues (2018) um modelo para otimização de agroecossistemas foi desenvolvido com a finalidade de maximizar a produtividade, mantendo o índice de sustentabilidade para todos os insumos em um nível estável. Já neste trabalho, a proposta é maximizar tanto a produtividade quanto o índice de sustentabilidade.

Do ponto de vista de otimização multiobjetivo, trata-se de um problema com dois objetivos e, para tentar resolver este tipo de problema, foram estudadas diversas metodologias para solução de problemas multiobjetivos. Para o caso da maximização do índice de sustentabilidade em específico, sabe-se que ele é limitado superiormente pela unidade, portanto, a estratégia adotada foi a de acrescentar ao problema a restrição de que o IS deva ser menor ou igual a 1, de modo que a restrição transforma o problema de PG signomial em um problema de PG reverso.

Os resultados encontrados pelo modelo de Rodrigues, são apresentados no Quadro 8, e em seguida, discutidos para uma melhor compreensão da solução alcançada. Cabe destacar que os agroecossistemas são tratados como agros nesta seção.

Quadro 8 - Solução do problema para os Agroecossistemas

Variáveis	Agro 1	Agro 2	Agro 3	Agro 4
Prod(ton)	10.305,75	13.713,47	24.747,77	15.823,10
Ar (ha)	85,96	114,70	208,54	132,66
Np (unid)	2.000	2.000	2.000	2.000
P (ton)	0,06	0,06	0,06	0,06
Pr (moeda)	620,81	620,89	621,02	620,91
E (Kwh/dia)	361,39	482,20	876,69	557,73
Ag (m^3)	0,03	0,03	0,03	0,03
Nc (unid)	66	89	161	102
V (moeda)	1.794,75	1.799,37	1.796,56	1.796,93
T (horas)	24	24	24	24
Agt (l)	4,12	4,04	4,05	4,05
Vazão	214,91	286,75	521,34	331,66
Nb (unid)	29	38	70	44
N (kg)	415,25	419,81	416,98	418,35
P (kg)	103,51	104,63	104,06	104,37
K (kg)	821,58	825,71	821,44	823,22
PC	0,49	0,49	0,49	0,49

Fonte: Rodrigues (2018).

Neste modelo foi imposto que o índice de Sustentabilidade estivesse no nível estável, resultando assim no Quadro 9 exposto abaixo.

Quadro 9 - Índice de sustentabilidade

Indicadores Sustentáveis	Agro 1	Agro 2	Agro 3	Agro 4
Consumo da Água	0,09	0,99	0,99	0,99
Uso de Agrotóxicos	1,00	1,00	1,00	1,00
Número de contratos	0,62	0,62	0,62	0,62
Consumo da Energia	0,66	0,66	0,66	0,66
Preço de venda	0,63	0,63	0,63	0,63
IS	0,78	0,78	0,78	0,78

Fonte: Rodrigues (2018).

Tal índice foi obtido por Rodrigues através de algumas restrições. Analisando inicialmente o Índice de Sustentabilidade proposto, tem-se: $IS = Aid^{-\beta}Ag^{\beta} +$ Enid$^{-\beta}E^{\beta} + (Das)^{\beta}Agt^{-\beta} + Nemp^{\theta}Nc^{-\theta} + \alpha s Precomin^{\beta}\ Pr^{\beta}$

Como $0 < IS \leq 1$, considerando o problema:

$$Max\ PC * Pr * P * Np * Ar \quad (34)$$

Sujeito a:

$$Ar \leq (1-\alpha) * AT \quad (35)$$

$$Ag * Np * Ar \leq Va * T \quad (36)$$

$$Ag \geq 0{,}03 \quad (37)$$

$$T \leq 24 \quad (38)$$

$$E \geq \frac{PotT}{1000} * \frac{Va}{Vmerc} \quad (39)$$

$$E \leq 3{,}72 \quad (40)$$

$$Prmink * fk^{-\gamma} * Ftk^{\gamma} \leq P \quad (41)$$

$$0{,}02 \leq P \leq 0{,}06 \quad (42)$$

$$Precomin \leq Pr \leq Precomax \quad (43)$$

$$V \geq Vsal \quad (44)$$

$$V \geq 2 * Vsal \quad (45)$$

$$Nc \leq Ar * Nemp \quad (46)$$

$$Ce * Tc * E + Cagt * Agt + Prfk * Ftk + Nc * V \leq PC * Pr * P * Np * Ar \quad (47)$$

$$Aid^{-\beta}Ag^{\beta} + \text{Enid}^{-\beta}E^{\beta} + (Das)^{\beta}Agt^{-\beta} + Nemp^{\theta}Nc^{-\theta} + Precomin^{\beta}\ Pr^{\beta} \geq 1 \quad (48)$$

Este problema é um caso de o problema de PG Signomial. Beigtler (1976) denomina de problema de PG reversa. Para resolver esse problema foi utilizada a desigualdade existente entre a média aritmética e a média geométrica, resolvendo assim uma sequência de problemas de PG Posinomial.

Sendo o índice de sustentabilidade $0 < IS \leq 1$ para determinar este índice em agroecosisstemas do tipo descrito neste trabalho foram definidas algumas variáveis I_A, I_E, I_D, I_n, I_P tais que:

$$0 < I_A, I_E, I_D, I_N, I_P \leq 1 \text{ e}$$

$$\frac{I_A}{Aid^{-\beta}Ag^{\beta}} \leq 1 \quad (49)$$

$$\frac{I_E}{Enid^{-\beta}E^{\beta}} \leq 1 \quad (50)$$

$$\frac{I_D}{(Das)^{\beta} Agt^{-\beta}} \leq 1 \quad (51)$$

$$\frac{I_N}{Nemp^{\theta} Nc^{-\theta}} \leq 1 \quad (52)$$

$$\frac{I_N}{Precomin^{\beta}\ Pr^{\beta}} \leq 1 \quad (53)$$

Definindo os pesos P_A, P_E, P_D, P_n, P_P tais que: $0 < P_A, P_E, P_D, P_n, P_P \leq 1$ e $P_A + P_E + P_D + P_n + P_P = 1$. O problema Biobjetivo proposto foi escrito da seguinte forma:

$$Min \frac{\theta}{PCPrPNpAr} + (1-\theta) * I \quad (53)$$

Sujeito a:

$$Ar \leq (1-\alpha) * AT \quad (54)$$

$$Ag * Np * Ar \leq Va * T \quad (55)$$

$$Ag \geq 0{,}03 \quad (56)$$

$$T \leq 24 \quad (57)$$

$$E \geq \frac{PotT}{1000} * \frac{Va}{Vmerc} \quad (58)$$

$$E \leq 3{,}72 \quad (59)$$

$$Prmink * fk^{-\gamma} * Ftk^{\gamma} \leq P \quad (60)$$

$$0{,}02 \leq P \leq 0{,}06 \quad (61)$$

$$Precomin \leq Pr \leq Precomax \quad (62)$$

$$V \geq Vsal \quad (63)$$

$$V \geq 2 * Vsal \quad (64)$$

$$Nc \leq Ar * Nemp \quad (65)$$

$$Ce * Tc * E + Cagt * Agt + Prfk * Ftk + Nc * V \leq PC * Pr * P * Np * Ar \quad (66)$$

$$\frac{I_A}{Aid^{-\beta} Ag^{\beta}} \leq 1 \quad (67)$$

$$\frac{I_E}{Enid^{-\beta} E^{\beta}} \leq 1 \quad (68)$$

$$\frac{I_D}{(Das)^{\beta} Agt^{-\beta}} \leq 1 \quad (69)$$

$$\frac{I_N}{Nemp^{\theta} Nc^{-\theta}} \leq 1 \quad (70)$$

$$\frac{I_N}{Precomin^{\beta}\ Pr^{\beta}} \leq 1 \quad (71)$$

$$\frac{{P_A}^2}{I_A} + \frac{{P_E}^2}{I_E} + \frac{{P_D}^2}{I_D} + \frac{{P_n}^2}{I_N} + \frac{{P_P}^2}{I_P} \leq 1 \quad (72)$$

onde $0 < \theta < 1$ e $1 - \theta$ são os pesos necessários no método das ponderações.

Para resolver esse problema a luz dos dados apresentados no Quadro 7, empregou-se o Algoritmo 2, alterando o *Passo 1* onde foi substituída a condensação por uma majoração pela média Harmônica, gerando uma sequência de problemas de programação geométrica posinomial. Cada problema de PG (Programação Geométrica) é resolvido usando o *Toolbox* CVX e os resultados gerados para cada um dos quatro Agroecossistemas foram dispostos no Quadro 10.

Quadro 10 - Solução do problema utilizando a otimização biobjetivo

Variáveis	**Agro 1**	**Agro 2**	**Agro 3**	**Agro 4**
Prod (ton)	10.308,33	13.753,09	24.998,17	15.905,71
Ar (ha)	85,96	114,70	208,54	132,66
Np (unid)	2.000	2.000	2.000	2.000
P (ton)	0,06	0,06	0,06	0,06
Pr (moeda)	542,09	542,13	542,12	542,14
E (Kwh/dia)	361,39	482,19	876,69	557,72
Ag (m^3)	0,03	0,03	0,03	0,03
Nc (unid)	96	128	232	148
V (moeda)	1.705,54	1.705,07	1.705,22	1.705,00
T (horas)	24	24	24	24
Agt (l)	3,75	3,79	3,78	3,80
Vazão	214,90	286,75	521,34	331,66
Nb (unid)	29	39	70	45
N (kg)	365,08	365,68	365,48	365,77
P (kg)	86,59	87,11	86,60	87,28
K (kg)	755,27	755,82	755,59	755,84
Pc	0,49	0,49	0,49	0,49

Fonte: Autoria própria, 2020.

- **Aumento da produção da cultura cultivada por planta (Prod)**

A produção total encontrada nos agroecossistemas estudados por Rodrigues (2018) foi aumentada significativamente em relação à produção inicialmente apresentada pelos agroecossitemas. A mudança foi significativa tendo em vista que a produção do agro 1 passou de 10.305,75 para 10.308,33 toneladas, no agro 2 de 13.713,47 para 13.753,09 toneladas, no agro 3 de 24.747,77 para 24.998,17 toneladas, e no agro 4 de 15.823,10 para 15.905,71 toneladas.

- **Redução da área utilizada para o plantio (Ar)**

Para encontrar a solução deste ponto do problema, o modelo de Rodrigues (2018) conseguiu reduzir a área utilizada para o plantio em cada agroecossistema de forma considerável. Porém, neste trabalho, não foi possível reduzir a área de plantio

utilizada, visto que já tinha se obtido a melhor redução desta no trabalho desenvolvido por Rodrigues (2018).

- **Aumento do número de plantas ou mudas (Np)**

A comparação entre o modelo de Rodrigues (2018) e o novo modelo proposto neste trabalho, no que se refere a quantidade de plantas produzidas por hectare, mostra que esse valor não foi alterado, já que no modelo anterior o número de plantas passou de 1850 p/ha para 2000, e manteve-se assim neste estudo.

- **Consumo de energia diário (E)**

O parâmetro estabelecido para a sustentabilidade em relação ao uso de energia foi um valor abaixo de 3,72 kWh/ha/dia. Porém, com o aumento do número de plantas, e por conseguinte da produção, também se obteve um aumento no consumo de energia. Considerando que neste novo modelo não houve alterações na área de plantio usada e no número de plantas ou mudas, portanto, os agroecossistemas 1, 2, 3 e 4 continuaram apresentando o consumo diário de 4,02kwh/ha/dia; 3,60 kwh/ha/dia; 3,50kwh/ha/dia e 3,60kwh/ha/dia, e com o modelo proposto por Rodrigues (2018) apresentaram o consumo médio de 4,20 kwh/ha/dia.

- **Consumo de água (Ag)**

Já a respeito ao consumo de água, notou-se que os resultados obtidos tanto através do estudo de Rodrigues (2018) quanto neste estudo, exibem o mesmo resultado para ambos os modelos. Portanto, os resultados apresentados foram de 30l/p/dia para cada agroecossistema (o parâmetro de consumo sustentável de água na cultura de banana), enquanto, anteriormente, os valores consumidos, respectivamente, pelos agros 1, 2, 3 e 4, era de 31 l/p/dia; 30,70 l/p/dia; 30,70 l/p/dia; e 38,80 l/p/dia.

Pode-se notar, portanto, que o modelo apresentou solução ótima para todos os agros, visto que se atingiu o mínimo de água necessária para o cultivo da banana, que é de 0,03 m^3 por planta ao dia.

- **Número de contratos de trabalho (Nc)**

Os resultados obtidos no que se refere ao número de contratos de trabalho foram inferiores aos inicialmente observados nos agroecossistemas (Quadro 3), haja vista que a área utilizada para o plantio também foi reduzida em todos os agros. Porém, em relação aos resultados encontrados pelo modelo proposto por Rodrigues (2018), como exposto no Quadro 8, o número de contratos aumentou. Levando em consideração que a

produção total também aumentou, passando de 66 contratos no agro 1, para 96, no agro 2 de 89 contratos para 128, no agro 3 de 161 para 232 e no agro 4 de 102 para 148. Porém, no que concerne à sustentabilidade dos agroecossistemas, o aumento dessa variável é visto de forma positiva, pois quanto mais empregos geram, mais sustentável são os agroecossistemas.

- **Valor do contrato de trabalho unitário (V)**

Para o valor do contrato de trabalho foi considerada a média próxima a dois salários-mínimos para trabalhadores da zona rural, no valor de R$1.996,00, portanto, os resultados encontrados para o salário que o gestor dos agroecossistemas pode pagar, foram satisfatórios, tendo em vista que apresentaram valores inferiores ao parâmetro estabelecido para o desenvolvimento da atividade agrícola: Agro 1 - R$ 1.705,54; Agro 2 - R$1.705,07; Agro 3- R$1.705,22 e Agro 4 - R$ 1.705,00. Resultados estes menores dos que foram obtidos no trabalho de Rodrigues, já que a média de valor foi de R$ 1.796,00, aproximadamente, já neste trabalho a média foi de R$ 1.705,00.

- **Tempo de utilização da bomba d'água para irrigação (T)**

Os resultados obtidos para o tempo de processamento da bomba d'água foi de, aproximadamente, 24 horas, para os quatro agroecossistemas em ambos os modelos desenvolvidos. Visto que o tempo estabelecido para o uso da bomba d'agua foi igual ou inferior a 20 horas. Portanto, o tempo de processamento obtido pelos modelos desenvolvido por Rodrigues (2018) e neste estudo, é maior que o tempo determinado, justificando-se pelo aumento do número de plantas por hectare.

- **Quantidade de agrotóxicos utilizados (Agt)**

A solução obtida pelo modelo desenvolvido neste trabalho obtém uma média de 0,38l/ha para cada agroecossistema, sabendo que, o parâmetro estabelecido foi de 0,50 l/ha, consequentemente, observa-se que os resultados foram bastante positivos. Comparados aos resultados alcançados no trabalho de Rodrigues (2018), este valor se localiza abaixo da média resultante deste trabalho, proporcionando assim, um melhor resultado para os agroecossistemas já que os agrotóxicos despendem muito dinheiro e causam danos à saúde humana.

- **Vazão**

O valor obtido para a vazão da água reflete a pressão e a velocidade de escoamento nos sistemas de irrigação dos agroecossistemas estudados, sendo

determinadas as vazões de 214,91 m³/s para o agro 1; 286,75 m³/s para o 2; 521,34 m³/s para o 3 e 331,66 m³/s para o 4, todos os valores foram mantidos também no modelo proposto por Rodrigues (2018).

- **Número de bombas (Nb)**

Em comparação a quantidade de bombas necessárias para a irrigação da cultura de banana encontrada pelo modelo de Rodrigues (Quadro 8) e pelo modelo proposto neste trabalho (Quadro 10), esta se manteve nos agros 1 e 3 e aumentou apenas em uma unidade nos agros 2 e 4, portanto, no agro 1 a quantidade foi de 29 bombas, no 2 de 38, no 3 de 70 e no 4 de 44.

- **Preço de Mercado (Pr)**

Pode-se verificar que os resultados encontrados para os preços de venda da banana, foram valores aceitáveis para todos os agroecossistemas: R$542,09, R$542,13, R$542,12 e R$542,14. Este resultado corrobora para a competitividade do produto no mercado e, consequentemente, na sustentabilidade desses agroecossistemas.

- **Quantidade de fertilizantes do tipo k a ser utilizada (Ftk – N, P e K)**

Os resultados atingidos para as quantidades de fertilizantes (N - Nitrogênio, P – Fósforo e K - Potássio) que devem ser empregados de modo sustentável na produção da cultura de banana irrigada dos agroecossistemas 1, 2, 3 e 4, respectivamente, foram os seguintes: N - (365,08 kg, 365,68 kg, 365,48 kg, 365,77 kg); P - (86,59 kg, 87,11 kg, 86,60 kg, e 87,28kg); K - (755,27 kg, 755,82 kg, 755,59 kg, e 755,84 kg).

Pode-se ressaltar que esses resultados são considerados ótimos, pois a quantidade de fertilizantes aplicada na produção esperada de banana foi ainda menor do que no modelo determinado por Rodrigues (2018), conforme o Quadro 8.

- **Percentual do valor da produção gasto com custos (PC)**

No que se refere ao percentual gasto na produção da banana, o valor está dentro do limite proposto pela restrição de produtividade, visto que os custos devem ocupar, no máximo, 50% do valor total da produção. Portanto, observa-se que os 4 (quatro) agros gastam em torno de 49% do valor obtido na produção total, corroborando tanto com o modelo proposto por Rodrigues (2018) quanto neste trabalho, contribuindo assim, para o aumento da produtividade nesses agroecossistemas.

4.2. Índice de Sustentabilidade

Foi determinado um índice de sustentabilidade com o objetivo de mensurar a sustentabilidade nos agroecossistemas estudados, e por sua vez, certificar se o nível de sustentabilidade obtido pode ser avaliado como estável ou ótimo. Conforme o IDS desenvolvido por Sepúlveda (2008), quando o estado de sustentabilidade do agroecossistema estiver entre os níveis de 0 a 0,2 é considerado em nível de colapso, entre 0,2 a 0,4 em estado crítico, entre 0,4 a 0,6 em estado instável, entre 0,6 a 0,8 é considerado estável e de 0,8 a 1,00, em nível ótimo de sustentabilidade. No Quadro 11, pode-se verificar o valor do IS (índice de sustentabilidade) obtido pelos quatro agroecossistemas.

Quadro 11 – Índice de sustentabilidade utilizando a otimização biobjetivo

INDICADORES SUSTENTÁVEIS	**AGRO 1**	**AGRO 2**	**AGRO 3**	**AGRO 4**
Consumo de água	0,99	0,99	0,99	0,99
Consumo de energia	0,99	0,99	0,99	0,99
Uso de agrotóxico	0,99	0,99	0,99	0,99
Número de contratos	0,66	0,66	0,66	0,66
Preço de venda	0,99	0,99	0,99	0,99
IS	0,93	0,93	0,93	0,93

Fonte: Autoria própria, 2020.

O quadro acima expõe que os indicadores de consumo de água, de energia, do uso de agrotóxicos e de preço de venda, que, para os 4 agros obtiveram o valor de 0,99, o qual pode ser considerado um nível ótimo de sustentabilidade, já que o limite imposto neste trabalho foi de 1. Já o indicador do número de contratos alcançou uma média de 0,66 para os 4 agros, estando acima da faixa de sustentabilidade considerada, pois quanto menor este índice, melhor é para os agroecossistemas, tendo em vista que os contratos de trabalho são uma das variáveis mais dispendiosas. Quando comparados aos índices obtidos no trabalho de Rodrigues (Quadro 9), este número reduziu, o que fez com que estes resultados fossem mais positivos do que o modelo anterior.

A mensuração de todos os índices obteve a média de 0,93, podendo concluir que os resultados encontrados para a maximização da produção e do índice de sustentabilidade estiveram dentro do nível estável de sustentabilidade uma vez que este número se localiza nesta faixa, conforme Sepúlveda (2008).

Os índices obtidos para os níveis de consumo de água e de uso de agrotóxicos se mantiveram constantes tanto no estudo de Rodrigues quanto neste. Já para os demais,

nota-se uma melhora significativa dos índices para todos os agroecossistemas, conseguindo assim, maximizar não apenas os índices, de forma individual, como também a média geral destes, ou seja, o IS dos agroecossistemas.

Dessa forma, pode-se considerar que a solução encontrada para este modelo é considerada viável e ótima, haja vista que os índices de sustentabilidade estão na faixa de valores estabelecida como ótima por Sepúlveda (2008) e que estes foram melhorados quando comparados ao modelo proposto por Rodrigues, alcançando assim, o objetivo deste estudo.

4.3. Solução do Modelo

Diante do que foi exposto nos resultados devido a implementação do modelo de otimização, pode-se inferir que a função objetivo de maximixar $PrPNp$Ar (preço, produção por planta, número de plantas e área utilizada) e o IS foi atingida, já que a solução é considerada viável e ótima para os quatro agroecossistemas estudados, validando assim o modelo proposto.

Salienta-se ainda que o modelo de otimização e sustentabilidade aplicado neste trabalho, corrobora a capacidade que os agrossistemas podem trabalhar de modo sustentável, tendo em vista que foram minimizados os consumos de água, energia, agrotóxicos e fertilizantes.

Nesse sentido, entende-se a relevância dos modelos de otimização que busquem a maximização dos lucros, minimizando os custos e melhorem os níveis de sustentabilidade.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa abordou uma visão sobre otimização e sustentabilidade em agroecossistemas por meio do emprego de indicadores com a finalidade de atender às dimensões da sustentabilidade juntamente com a otimização biobjetivo, sendo, dessa forma, considerada um diferencial em relação aos estudos de otimização encontrados na literatura.

Para isso, este trabalho teve como objetivo a proposição da maximização de um índice de sustentabilidade e da produção total possível de agroecossistemas com o uso da otimização multiobjetivo.

Desta forma, para atingir esse objetivo foram estabelecidos os objetivos específicos, os quais se relacionam: à exploração dos conceitos e abordagens da temática; à seleção dos métodos que avaliam a sustentabilidade agrícola nos agroecossistemas; à identificação dos indicadores de sustentabilidade para a composição do modelo; à definição das relações entre os agentes do agroecossistema e os indicadores de sustentabilidade; à construção do modelo de otimização e sustentabilidade de agroecossistemas; à resolução do problema com aplicação do método de programação biobjetivo, que para alcance dos resultados, realizou-se a implementação computacional; e às soluções que contribuem para maximização do índice de sustentabilidade e a produção total dos agroecossistemas.

A implementação da programação geométrica possibilitou o encontro de uma solução considerada viável e ótima, na medida em que se maximizando a produção dos agroecossistemas estudados, verificam-se níveis estáveis de sustentabilidade melhores dos que os já obtidos no estudo de Rodrigues (2018), conforme foi identificado pelo Índice de Sustentabilidade proposto anteriormente, constatando, desse modo, que a finalidade desse estudo foi alcançada.

Contudo, a pesquisa se torna limitada pela utilização dos dados secundários para a construção do modelo, tendo em vista que não houve contato direto com os membros do agroecossistema analisados, já que o estudo se baseou em dados de um estudo selecionado.

REFERÊNCIAS

ADEKANMBI, O.; OLUGBARA, O; ADEYEMO, J. A *Comparative Study of State-of-the-Art Evolutionary Multi-objective Algorithms for Optimal Crop-mix planning.* **International Journal of Agricultural Science and Technology.** v. 2. 2014.

ALMEIDA, J; NAVARRO, Z. (Org.). Reconstruindo a agricultura: ideias e ideais na perspectiva de um desenvolvimento rural sustentável. 2° ed. Porto Alegre. **Ed. Universidade/ UFRGS**, 1998. p,149.

ALUEVA, A; PEREZ, A. Un nuevo algoritmo em programacion signomial. **Trabajos de investgacion operativa.** Vol. 7, num 1, p 135-156, 1992.

ALTIERI, M. A. Agroecologia – A dinâmica produtiva da agricultura sustentável. 4.ed. Porto Alegre: Editora da **UFRGS**, 2004. 110p.

ALTIERI, M. A. *The ecological role of biodiversity in agroecosystems*. **Agriculture Ecosystems and Environment**. v. 74, p. 19–31, 1999.

ALTIERI, M. A; MASERA, O. Desenvolvimento rural sustentável na América Latina: construindo de baixo para cima. Reconstruindo a Agricultura: ideias e ideais na perspectiva de um desenvolvimento rural sustentável. In: ALMEIDA, J; NAVARRO, Z. (Org.). Reconstruindo a Agricultura: ideias e ideais na perspectiva de um desenvolvimento rural sustentável. 2° ed. Porto Alegre. **Ed. Universidade/ UFRGS**, 1998. p,149.

ALTIERI, M. A.; NICHOLLS, C. *Agroecología: teoría y práctica para una agricultura sustentable.* **México: PNUMA**, 2000. 250p.

ARENALES, M. N.; ARMENTANO, V. A.; MORABITO, R.; YANASSE, H. H. Pesquisa Operacional, Editora **Campus/Elsevier**, 2ª edição, ISBN 85-352-1454-3, Rio de Janeiro, 2007, 723p.

ARROYO, J. E. C. Heurísticas e metaheurísticas para otimização combinatória multiobjetivo. **Tese de doutorado**, Unicamp, 2002.

ASTIER, M.; SPEELMAN, E.; LOPEZ-RIDAURA, S.; MASERA, O.; GONZÁLEZ-ESQUIVEL, C. *Sustainability indicators, alternative strategies and trade-offs in peasant agroecosystems: Analysing 15 case studies from Latin America*. **International Journal of Agricultural Sustainability**. v. 9. p. 409-422, 2011.

AZAPAGIC, A. *Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimisation*. **Chemical Engineering Journal**. v. 73, p. 1-21, 1999.

BARBIERI, J. C. Organizações inovadoras sustentáveis. In: BARBIERI, J.C.; SIMANTOB, M.A. (Org.). Organizações inovadoras sustentáveis: uma reflexão sobre o futuro das organizações. **São Paulo: Atlas**, 2007.

BEIGHTLER, C. S.; PHILLIPS, D.T. "Applied Geometric Programming", **John Wiley & Sons**, New York. 1976.

BEZLEPKINA, I.; REIDSMA, P.; SIEBER, S.; HELMING, K. *Integrated assessment of sustainability of agricultural systems and land use: Methods, tools and applications*. **Agricultural Systems**. v. 104. p. 105-109, 2011.

BONAUDO, T.; BENDAHAN, A.; SABATIER, R.; RYSCHAWY, J.; BELLON, S.; LÉGER, F.; MAGDA, D.; TICHIT, M. *Agroecological principles for the redesign of integrated crop–live stock systems*. **European Journal of Agronomy**. v. 57, p. 43-51, 2013.

BOUKHERROUB, T.; RUIZ, A.; GUINET, A.; FONDREVELLE, J. *An integrated approach for sustainable supply chain planning*. **Computers and Operations Research**, v. 54, p. 180-194, 2015.

BOYD, M. G. CVX: **Matlab software for disciplined convex programming,** version 2.0 beta. 2013. Disponível em: <http://cvxr.com/cvx>. Acessado em: 19 de julho 2020.

BRUNDTLAND, G. *Our Common Future: Report of the 1987 World Commission on Environment and Development*. **Oxford University Press**, Oxford, 1987.

CABELL, J; OELOFSE, M. *An indicator framework for assessing agroecosystem resilience*. **Ecology and Society**, v. 17, n. 1, 2012.

CALORIO, C. M. Análise de sustentabilidade em estabelecimentos agrícolas familiares no Vale do Guaporé - MT. **Dissertação de mestrado.** Mato Grosso, Cuiabá: Faculdade de Agronomia e Veterinária da Universidade Federal do Mato Grosso, 1997. p. 95.

CAPORAL, F. R; COSTABEBER, J. A. Agroecologia enfoque científico e estratégico para apoiar o desenvolvimento rural sustentável. **Porto Alegre**: EMATER/RS-ASCAR, 2002.

CARLETTO, G.; RUEL, M.; WINTERS, P.; ZEZZA, A. *Farm-Level Path ways to Improved Nutritional Status: Introduction to the Special Issue*. **The Journal of Development Studies**. v. 51. p. 945-957, 2015.

CARVALHO, J. R. M. DE; CURI, W. F.; ARAÚJO CARVALHO, E. K. M. A.; CURI, R. C. Indicadores de Sustentabilidade Hidroambiental: Um Estudo na Região do Alto Curso do Rio Paraíba, PB. **Revista Sociedade & Natureza**, Uberlândia, ano 23 n. 2, pp. 295-310, 20007.

DE CAMINO, R.; MÜLLER, S. *Sostenibilidad de la agricultura y los recursos naturales: bases para estabelecer indicadores*. **San José**: IICA, 134 p. (Série de Documentos de Programas IICA. 38). 1993.

CHANKONG, V.; HAIMES, Y. Y. *Multiobjective Decision Making: Theory and Methodology*. **Elservier - North Holland**, New York, 1983.

CAMELO, G. L. P.; CÂNDIDO, G.A. Sustentabilidade de agroecossistemas familiares de cultivo do abacaxi irrigado versus sequeiro em Touros (RN). In: SILVA, V.P. da; CÂNDIDO, G.A (Orgs). Indicadores de sustentabilidade em agroecossistemas: aplicações em diversos tipos de cultivo e práticas agrícolas do Rio Grande do Norte. ISBN 978-85-8161-070-2. 258p. **Natal: IFRN**, 2015.

CÁCERES, D. M. *Agrobiodiversity and technology in resource-poorfarms*. **Interciencia**, vol. 31, n.6, p. 403-410, 2006.

CHEN, Z. J.; CHENG, Z. Q. YAN, X. *Multiobjective Optimization Problem of Multireservoir System in Semiarid Areas.* **Mathematical Problems in Engineering**. 2013.

CHRISTOFOLETTI, A. Modelagem de sistemas ambientais. ISBN: 85-212-0177-X, v. 1, **São Paulo**, Edgarg Blucher, 1999.

COELLO COELLO, C. A. *A comprehensive survey of evolutionary-based multiobjective optimization techniques*. **Knowledge and information systems**, v. 1, p. 269–308, 1999.

COELLO COELLO, C. A. *Evolutionary multi-objective optimization: a histórical view of the field*. **Computational Intelligence Magazine**, IEEE, 1(1), p. 28–36, 2006.

COELLO COELLO, C. A. C.; LAMONT, G. B.; VELDHUIZEN, D. A. V. *Evolutionary algorithms for solving multi-objetive problems*. **New York: Springer**, 2007. 610 p.

COHON, J. L. *Multiobjective programming and planning*. **New York: Dover**, 2003. 352p.

CORRÊA, I. V. Indicadores de sustentabilidade para agroecossistemas em transição agroecológica na região sul do Rio Grande do Sul. 2007. 89 f. **Dissertação (Mestrado)**. Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas - RS.

COSTA, A. A. V. M. R. Agricultura sustentável II: Avaliação. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 33, n. 2, p.75-89, 2010.

DEPONTI, C. M.; ECKERT, C.; AZAMBUJA, J. L. B. D. Estratégia para construção de indicadores para avaliação da sustentabilidade e monitoramento de sistemas. **Agroecologia e desenvolvimento rural sustentável**, v. 3, n. 4, p. 44-52, 2002.

DE MEYER, A.; CATTRYSSE, D.; RASINMÄKI, J.; ORSHOVEN, J. *Methods to optimisethe design and management of biomass-for-bioenergy supply chains: A review*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 31. p. 657–670, 2014.

DI FELICE, V. R.; MANCINELLI, R; PROULX, R.; CAMPIGLIA, E. *A multivariate analysis for evaluating the environmental and economical aspects of agroecosystem sustainability in central Italy*. **Journal of environmental management.** v. 98, p. 119-26. 2012.

EDGEWORTH, F. Y. *Mathematical physics.* P. Keagan, **London**, England. 1881.

ENGAU, A; WIECEK, M. M. *Introducing non polyhedral cones into multiobjective programming*, in: V. Barichard, M. Ehrgott, X. Gandibleux, V. T'kindt (Eds.), Multiobjective Programmingand Goal Programming: **Theoretical Revista Gestão Industrial** 66 Resultsand Practical Applications, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, vol. 618, Springer, Berlin, pp. 35–45 (Chapter 4), 2009.

EHLERS, E. Agricultura Sustentável: origens e perspectivas de um novo paradigma. 2a. ed. **Guaiba - RS: Agropecuária**, 1999. 157p.

FAO, 2014. *FINAL REPORT for the International Symposium on Agroecology for Food Security and Nutrition*. **Rome.**

FATURETO, C. R. C. Otimização sob Critérios Múltiplos: Metodologias e uma Aplicação para o Planejamento Agrícola. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa. **Tese (Doutorado em Economia Rural)** - Departamento de Economia Rural, p. 145, 1997.

FINIZIO, A.; CALLIERA, M.; VIGHI, M. *Rating systems for pesticide risk classification on different ecosystem.* **Ecotoxicology and Environmental Safety.** 49, p. 262–274, 2001.

GAMEDA, S.; DUMANSKI, J. *Framework for evaluation of sustainable land management: A case study of two rain-fed cereal-livestock farming systems in the Black Chernozemic soil zone of southern Alberta, Canada*. **Canadian Journal of Soil Science**. v. 75, p. 429-437, 1995.

GARCIA, C. Modelagem e simulação de processos industriais e de sistemas eletromecânicos. ISBN: 978-85-314-0904-2. 2 ed. Ver e ampl. 1. Reimp - **Editora da Universidade de São Paulo**, São Paulo, 2009.

GHADERI, H.; PISHVAEE, S.; MOINI, *A. Biomass supply chain network design: an optimization-oriente dreview and analysis*. **Industrial Cropsand Products**, v. 94, p. 972–1000, 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.027. Acesso em: 01 dez. 2018.

GLIESSMAN, S. R. Agroecologia – Processos Ecológicos em Agricultura Sustentável. **Porto Alegre: UFRGS**, 2009. 653p.

GLIESSMAN, S. R. Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável. 3. ed. Porto Alegre: **Editora da UFRGS**, 2005. 653 p.

GLIESSMAN, S. R. A agricultura pode ser sustentável. EMATER/RS. Rio Grande do Sul, 2003. **Entrevista concedida a Jornalista Ângela Filippi.** Disponível em: < http://www.emater.tche.br/docs/agroeco/revista/n3/03-entrevista.htm>. Acesso: 21 de fev.de 2019.

GROOT, J. C. J; OOMEN, G. J. M; ROSSING, W. A. H. *Multi-objective optimization and design of farming systems.* **Agricultural Systems**, v. 110, p. 63-77, 2012.

GOLDBARG, M. C; LUNA. H. P. L. Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos. ISBN 978-85-352-1250-5. 2 ed. **Elsevier**, 9 impressão. Rio de janeiro, 2005.

GOMES, A. M. C. G; CARIGNANO, C. Tomada de decisões em cenários complexos. **Editora Pioneira Thompson Learning**, Rio de Janeiro, 2004.

GUZMÁN, E. S.; DE MOLINA, M. G.; ALONSO, A. M. *The land cost of agrarian sustainability*. **An assessment. Land Use Policy**, v. 28, n. 4, p. 825-835, 2011.

HANSEN, J.W. *Is agricultural sustainability an useful concept?* **Agricultural Systems**, v. 50 (2), p. 117-143, 1996.

HATT, S.; BOERAEVE, F.; ARTRU, S.; DUFRÊNE, M.; FRANCIS, F. *Spatial diversification of agroecosystems to enhance biological control and other regulatin gservices: an agroecological perspective.* **Science of the Total Environment**. v. 621, p. 600–611, 2018.

JESUS, E. L. Avaliação da sustentabilidade de propriedades agrícolas do Estado do Rio de Janeiro, utilizando o método IDEA. **Tese de Doutorado em Agronomia**, Ciência do Solo. Seropédica: UFRRJ, 2003.

JUNGES, J. R. Bioética e meio ambiente no Brasil: uma abordagem hermenêutica. **Escola de formação fé, política e trabalho** – **Diocese de Caxias do Sul**, 2008. Disponível em: <http://www.pastoraldecaxias.org.br/>, acesso em: 14 fev. 2019.

LACHTERMARCHER, G. Pesquisa Operacional na tomada de decisões. ISBN 978-85-7605-093-. São Paulo. **Pearson Prentice Hall**, 2009.

LIU, Z.; HUANG, Y**.** *Sustainability enhancement undie run certainty: a Monte Carlo-based simulationand system optimization method.* **Clean Technologies and Environmental Policy,** v. 17, n. 7, p. 1757-1768, 2015.

LOUCKS, P.; VAN BEEK, E.; STEDINGER, J.; DIJKMAN, J. P. M. *Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models And Applications*. **UNESCO Digital Library**, Paris, 2005.

MA (*Millennium Ecosystem Assessment*). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. **Island Press**, Washington D.C, 2005.

MASERA, O.; ASTIER, M.; LÓPEZ-RIDAURA, S. *Sustentabilidad Y Manejo de Recursos Naturales: el marco de evaluación MESMIS*. **México: Mundi-Prensa**, p. 109, 1999.

MARZALL, K.; ALMEIDA, J. Indicadores de Sustentabilidade para Agroecossistemas. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**, Brasília, v.17, n.1, p.41-59, 2000.

MIETTINEN, K. Nonlinear Multiobjective Optimization. **Kluwer Academic Publishers**, Boston (1999).

MILLENIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. *Ecosystems and Human Well-Being – Synthesis.* **Island Press**, Washington D.C, 2005.

MÜLLER, S. *Como medir la sostenibilidad? Una propuesta para elarea de la agricultura y de los recursos naturales*. **IICA/BMZ/GTZ**, Costa Rica, 55 pp. (Serie Documentos de Discusión sobre Agricultura Sostenible y Recursos Naturales, N.º 1). 1996.

OLIVEIRA, L. S de. Uma contribuição ao estudo dos métodos de otimização multiobjetivo. **Dissertação (Mestrado)**, Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. 2005.

PANNELL, D. J.; GLENN, N. A. *A framework for the economic evaluation and selection of sustainability indicators in agriculture*. **Ecological Economics.** 33 (1), p. 135–149, 2000.

PARETO, V. *Cours d'economie politique*, volume I and II. F. **Rouge**, Lausanne. 1896.

PEREIRA, G. W. Aplicação da técnica de recozimento simulado em problemas de planejamento florestal multiobjetivo. **Dissertação de mestrado**, UFMG, Belo Horizonte, MG. 2004.

PLIENINGER, T.; SCHLEYER, C.; SCHAICH, H.; OHNESORGE, B.; GERDES, H.; HERNÁNDEZ-MORCILLO, M.; BIELING, C. *Mainstreaming ecosystem servisse sthrough reformed European agricultural policies.* **Conservation Letters.** v. 5. p. 281-288, 2012.

REIS, L. M. M. Avaliação de Sustentabilidade de Agroecossistemas de Bananeira Irrigada de formas diferentes de produção moderna e tradicional: O Caso de Ipanguaçu–RN. 2013. 211f. **Tese (Doutorado).** Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande.

ROBOREDO, D.; BERGAMASCO, S. M. P. P.; BLEICH, M. E. *Aggregate index of social–environmental sustainability to evaluate the social–environmental quality in a watershed in the Southern Amazon.* **Ecological Indicators**, v. 63, p. 337-345, 2016.

RODRIGUES, D. O. F. Otimização e sustentabilidade de agroecossistemas. 101f. **Dissertação (mestrado).** Programa de pós-graduação em engenharia de produção. Universidade Federal da Paraíba – UFPB, João Pessoa – PB: 2018.

ROSAL, M. C. F. Programação não linear aplicada à otimização de redes pressurizadas de distribuição de água. 117f**. Dissertação (mestrado).** Programa de Pós-graduação em engenharia civil. Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife – PE: 2007.

SABATINO, S.; FRANGOPOL, D.; DONG, Y. *Sustainability-informed maintenance optimization of highway bridges considering multi-attribute utility and risk attitude.* **Engineering Structures**. vol.102, p. 310–321, 2015.

SCHWEFEL, H. P. *Evolution and optimization seeking*. **John Wiley and Sons**, New york, 1995.

SEMPORE , A. W.; ANDRIEU, N.; NACRO, H. B.; SEDOGO, M. P. *Relevancy and role ofwhole-farmmodels in supporting small holder farmers in planning their agricultural season.* **Environmental Modelling and Software.** v. 68. p.147-155, 2015.

SEPÚLVEDA, S. S. *Biograma: metodología para estimar el indice de desarrollo sostenible de territorios.* **San José, C.R.: IICA**, 2008.

SILVA, V. P. D.; CÂNDIDO, G.A. Sustentabilidade de geossistema familiar de produção de mandioca alternativo versus convencional. In: SILVA, V.P. da; CÂNDIDO, G.A (Orgs). Indicadores de sustentabilidade em agroecossistemas: aplicações em diversos tipos de cultivo e práticas agrícolas do Rio Grande do Norte. ISBN 978-85-8161-070-2. 258p. **Natal: IFRN,** 2015.

SOUZA, J. L. M. DE; GERSTEMBERGER, E.; ARAUJO, M. A. Calibração de modelos agrometeorológicos para estimar a produtividade da cultura do trigo, considerando sistemas de manejo do solo, em Ponta Grossa-PR. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 4, p. 409–418, 2013.

SICHE, R.; AGOSTINHO, F.; ORTEGA, E.; ROMEIRO, A. Índices versus indicadores: Precisões conceituais na discussão da sustentabilidade de países. **Ambiente & sociedade.** v. 10. p. 137-148, 2007.

TAN, F.; LU, Z. *Assessing regional sustainable development through an integration of nonlinear principal component analysis and Gram Schmidt orthogonalization.* **Ecological Indicators**, v. 63, p. 71-81, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.11.018>. Acesso em: 10 de dez. 2018.

TEEB, 2010. *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological Foundations*. Edited by **Pushpam Kurnar**. Earthscan, London and Washington DC.

TICONA, W. G. C. Algoritmos evolutivos multiobjetivo para a reconstrução de árvores filogenéticas. **Tese de doutorado**, ICMC, USP, São Carlos, S.P., 2003.

UNITED NATIONS. *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development.* **United Nations General Assembly Resolution**, 2015 September 18. 2015. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>. Acesso em: 10 out. 2018.

UNITED NATIONS ECONOMIC AND SOCIAL COUNCIL. *Report of the Inter-Agency and Expert Group on Sustainable Development Goal Indicators*. E/CN.3/2016/**Rev.1. New York City**, NY, USA, 2016.

SICHE *Our Common Future Brundtland Report. United Nations World Commission on Environment and Development*. **Oxford University Press**, Oxford, 1987.

VADREVU, K.; CARDINA, J.; HITZHUSEN, F.; BAYOH, I.; MOORE, R.; PARKER, J.; STINNER, B.; STINNER, D.; HOY, C. *Case Studyofan Integrated Framework for Quantifying Agroecosystem Health.* **Ecosystems.** v. 11. p. 283-306, 2008.

VAN BELLEN, H. M. Indicadores de sustentabilidade: uma análise comparativa. Rio de Janeiro: **Editora FGV**, 2005.

VAN DER WERF, H. M.G.; TZILIVAKIS, J.; LEWIS, K.; BASSET-MENS, C. *Environmental impacts of farm scenarios according to five assessment methods*. **Agriculture Ecosystems and Environment**. v. 118, p. 327–338, 2007.

VERONA, L. A. F. Avaliação de sustentabilidade em agroecossistemas de base familiar e em transição agroecológica na região Sul do Rio Grande do Sul. **Tese de Doutorado**. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas – RS, 2008.

VILAIN, L. *La méthode IDEA: Indicateurs de durabilitédes explotations agricoles: Guide d'utilisation. 1 èreédition.* **Editions Educagri**, Dijon, France, 2000. 100 p.

WEZEL, A.; CASAGRANDE, M.; CELETTE, F.; JEAN-FRANÇOIS, V.; FERRER, A.; PEIGNÉ, J. *Agroecological practices for sustainable agriculture. A review.* **Agronomy for Sustainable Development.** v. 34. p. 1-20, 2014.

WILLIAMS, D. L. *Students' knowledge of and expected impact of sustainable agriculture.* **Journal of Agricultural Education**. 41(2): p. 19–24, 2000.

WATTENBACH, H; FRIEDRICH, K. H. *Farming systems indicators for sustainable natural resource management.* In FAO (eds.), Land quality indicators and their use in sustainable agriculture and rural development (pp. 105–117). **Rome: FAO**, 1998.

XEVI, E.; KHAN, S. *A multi-objective optimisation approach to water management.* **Jounal of Environmental Management.** 77, 269e277, 1998.

YUE, D.; SLIVINSKY, M.; SUMPTER, J.; YOU, F. *Sustainable Design and Operation of Cellulosic Bioelectricity Supply Chain Networks with Life Cycle Economic, Environmental, and Social Optimization.* **Industrial & Engineering Chemistry Research.** v. 53, p. 4008–4029, 2014.

ZITZLER, E. *Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Applications.* **Ph.D. thesis**, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 1999.

ZHANG, X.; DAVIDSON, E.; MAUZERALL, D.; SEARCHINGER, T.; DUMAS, P.; SHEN, Y. *Managing nitrogen for sustainable development.* **Nature.** 528. p. 51-59, 2015.

ZUREK, M.; KEENLYSIDE, P.; BRANDT, K. *Intensifying agricultural production sustainably: a framework for analysis and decision support*. Amsterdam. **The Netherlands: International Food Policy Research Institute (IFPRI).** 2015.