



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**CARLOS SILVA DAMBROZ**

**ALGORITMO GENÉTICO APLICADO AO PLANEJAMENTO DO USO DO SOLO  
COM VISTAS À  
QUALIDADE AMBIENTAL E RETORNO ECONÔMICO**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2018

**CARLOS SILVA DAMBROZ**

**ALGORITMO GENÉTICO APLICADO AO PLANEJAMENTO DO USO DO SOLO  
COM VISTAS À  
QUALIDADE AMBIENTAL E RETORNO ECONÔMICO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.  
Orientador: Prof. Dr. Roberto Avelino Cecílio  
Coorientador: Prof. Dr. Sidney Sara Zanetti

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Setorial Sul, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

D156a Dambroz, Carlos Silva, 1984-  
Algoritmo genético aplicado ao planejamento do uso do solo com  
vistas à qualidade ambiental e retorno econômico / Carlos Silva  
Dambroz. – 2018.  
102 f. : il.

Orientador: Roberto Avelino Cecílio.

Coorientador: Sidney Sara Zanetti.

Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal  
do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Política ambiental. 2. Solos - Uso. 3. Recursos hídricos. I.  
Cecílio, Roberto Avelino. II. Zanetti, Sidney Sara. III. Universidade  
Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.  
IV. Título.

CDU: 630

**ALGORITMO GENÉTICO APLICADO AO PLANEJAMENTO DO USO DO SOLO  
COM VISTAS À QUALIDADE AMBIENTAL E RETORNO ECONÔMICO**

**Carlos Silva Dambroz**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 28 de agosto de 2018.



---

**Prof. Dr. João Paulo Bestete de Oliveira** (Examinador externo)  
Instituto Federal do Espírito Santo



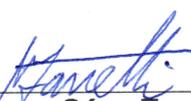
---

**Prof. Dr. Helder de Amorim Mendes** (Examinador externo)  
Universidade Federal do Espírito Santo



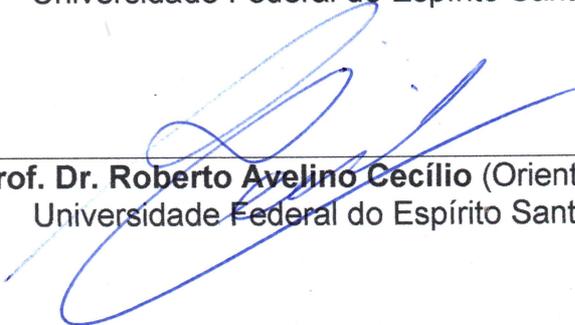
---

**Prof. Dr. Alexandre Candido Xavier** (Examinador externo)  
Universidade Federal do Espírito Santo



---

**Prof. Dr. Sidney Sara Zanetti** (Coorientador)  
Universidade Federal do Espírito Santo



---

**Prof. Dr. Roberto Avelino Cecílio** (Orientador)  
Universidade Federal do Espírito Santo

À natureza,  
Dedico.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família pelo grande suporte, pela compreensão de minhas ausências e estresses. Pelo “vale-baby” proporcionado!

Agradeço muito aos meus orientadores, Prof. Dr. Roberto Avelino Cecilio e Prof. Dr. Sidney Sara Zanetti, pelos ensinamentos, confiança, troca de ideias e por aceitarem o tema deste trabalho.

Ao professor Prof. Dr. Hélder Amorim Mendes, pela grande ajuda.

Ao Prof. Dr. Geraldo Regis Mauri e ao Prof. Dr. Alexandre Candido Xavier pela colaboração.

À CAPES e à FAPES pela bolsa fornecida.

Ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira e ao Programada de Pós-graduação em Ciências Florestais.

Ao Instituto Federal Fluminense – *campus* Bom Jesus do Itabapoana por oportunizar a realização deste trabalho e pela bolsa de capacitação.

Aos meus colegas do IFF pelo apoio durante a elaboração deste trabalho.

A todos os colegas de laboratório pelos cafés.

A todos que participaram de minha vida durante esses anos.

Aos amigos que fiz durante este período.

*“A verdadeira pobreza é gastar a vida preocupado em viver acumulando, acumulando, acumulando. É preciso fazer as coisas que você gosta e ama. Se você não conseguir a felicidade com pouco, nunca a conseguirá.”*

*(Pepe Mujica)*

## RESUMO

DAMBROZ, Carlos Silva. **Algoritmo genético aplicado ao planejamento do uso do solo com vistas à qualidade ambiental e retorno econômico**. 2018. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Prof. Dr. Roberto Avelino Cecílio. Coorientador: Prof. Dr. Sidney Sara Zanetti.

O planejamento do uso da terra é uma atividade complexa que considera tanto fatores ambientais quanto sócio-econômicos. Em um cenário de degradação deve-se elaborar estratégias que permitam a melhor utilização dos recursos naturais e evitar a super exploração dos mesmos. Este trabalho objetivou desenvolver um método para ser aplicado no planejamento do uso do solo em microbacias em nível de *pixel*. Foram consideradas as variáveis ambientais, perda de solo e excedente hídrico, e a variável econômica renda bruta, em um processo de otimização. A otimização foi implementada através de Algoritmo Genético em conjunto com o uso do método Processo Analítico Hierárquico. Aplicou-se o método em quatro regiões distintas usando diferentes cenários para avaliação. A metodologia desenvolvida é uma eficiente ferramenta para suporte à tomada de decisão no planejamento ambiental. O método apresenta flexibilização para ser adotado em regiões com características físicas bem distintas e para atender a demanda local dos tomadores de decisão.

**Palavras-chave:** classes de uso da terra. otimização. processo analítico hierárquico

## **ABSTRACT**

DAMBROZ, Carlos Silva. **Genetic algorithm applied to land use planning considering environmental quality and economic return.** 2018. Thesis (Doctor's degree in Forest Science) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Adviser: Prof. Dr. Roberto Avelino Cecílio. Co-Adviser: Prof. Dr. Sidney Sara Zanetti.

Land use planning is a complex activity that considers both environmental and socio-economic factors. In a degradation scenario, strategies should be developed that allow the best use of natural resources and avoid its overexploitation. This work aimed to develop a method to be applied in catchments land use planning at a pixel level. The environmental variables, soil loss and water surplus, and the economic variable, gross income, were considered in an optimization process. The optimization was implemented through Genetic Algorithm in association with the use of the Analytic Hierarchy Process method. The method was applied in four different regions using different scenarios for evaluation. The developed method is an efficient tool to support decision making in environmental planning. The technique presents flexibility to be adopted in regions with very distinct physical characteristics and to achieve the local decision makers demand.

**Keywords:** land use classes. optimization. analytic hierarchy process

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. OBJETIVO GERAL.....	14
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	15
3.1 Capacidade de uso da terra.....	15
3.2 Balanço hídrico.....	18
3.3 Perda de solo.....	20
3.4 Processo analítico hierárquico (AHP).....	22
3.5 Otimização do uso da terra.....	23
3.6 Pagamento por serviços ambientais.....	25
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	28
4.1 Método proposto.....	28
4.1.1 Elaboração do modelo matemático.....	30
4.1.2 Implementação do algoritmo.....	31
4.1.2.1 Descrição geral.....	31
4.1.2.2 Restrição espacial.....	32
4.1.2.3 Inicialização.....	33
4.1.2.4 Cruzamento.....	33
4.1.2.5 Mutação.....	34
4.1.3 Variáveis utilizadas.....	36
4.1.3.1 Cálculo da perda de solo.....	36
4.1.3.2 Cálculo do excedente hídrico.....	37
4.1.3.3 Cálculo da renda bruta.....	39
4.1.4 AHP- Saaty.....	39
4.2 Estudo de caso.....	41
4.2.1 Área de estudo.....	41
4.2.2 Restrições de classes de uso do solo.....	43
4.2.3 Variáveis de interesses.....	45
4.2.3.1 Perda de solo.....	45
4.2.3.2 Excedente hídrico.....	46
4.2.3.3 Renda bruta.....	49
4.2.4 AHP - Saaty.....	51
4.2.5 Cenários de aplicação.....	51
4.2.5.1 Análise de sensibilidade.....	51
4.2.5.2 Aplicação dos pesos AHP.....	52

4.2.5.3 Restrição de classe de uso e desmatamento.....	52
4.2.5.4 Variação na renda da mata nativa.....	53
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
5.1 Balanço hídrico.....	54
5.2 Simulação para as microbacias.....	57
5.2.1 Microbacia de Alegre.....	57
5.2.1.1 Análise de sensibilidade.....	57
5.2.1.2 Aplicação dos pesos AHP.....	58
5.2.1.3 Restrição de classes de uso e mata nativa fixa.....	62
5.2.1.4 Variação na renda da mata nativa.....	64
5.2.2 Microbacia de Santa Leopoldina.....	65
5.2.2.1 Análise de sensibilidade.....	65
5.2.2.2 Restrição de classes de uso e mata nativa fixa.....	68
5.2.2.3 Variação na renda da mata nativa.....	69
5.2.3 Microbacia de São Mateus.....	70
5.2.3.1 Análise de sensibilidade.....	70
5.2.3.2 Restrição de classes de uso e mata nativa fixa.....	72
5.2.3.3 Variação na renda da mata nativa.....	74
5.2.4 Microbacia de Linhares.....	75
5.2.4.1 Análise de sensibilidade.....	75
5.2.4.2 Restrição de classes de uso e mata nativa fixa.....	77
5.2.4.3 Variação na renda da mata nativa.....	79
5.3 Discussão geral do método.....	80
6. CONCLUSÕES.....	93
7. REFERÊNCIAS.....	94

## 1. INTRODUÇÃO

A sociedade é dependente dos ecossistemas naturais e de serviços ambientais. O consumo e o crescimento populacional aumentam a demanda por alimentos, produção de energia e consumo de recursos naturais (Pimentel et al. (2009), Koh e Lee (2012) e Tschamtkke et al. (2012)). A disputa por terra por diversos usos do solo causa ameaças à conservação de áreas naturais.

A cobertura e uso da terra influenciam os serviços ambientais e sua mudança, em grande parte consequência da ação antrópica, permite que a sociedade se aproprie dos recursos naturais da Terra. A mudança do uso do solo frequentemente diminui a capacidade do ecossistema em manter a produção de alimentos (Foley *et al.*, 2005), causa a perda da biodiversidade (Fahrig, 2003), aumenta o carbono atmosférico (Houghton *et al.*, 2012), diminui a qualidade do solo (Islam e Weil, 2000) e altera os processos hidrológicos (Wu *et al.*, 2013).

A desconformidade entre os usos da terra e a capacidade suporte dos solos gera um excesso de exploração dos recursos naturais por meio de cultivos inapropriados que degradam a capacidade suporte do ambiente.

A vegetação natural desempenha papel na conservação da biodiversidade e no ciclo hidrológico, contribuindo para que a bacia hidrográfica seja grande provedora de alguns serviços do ecossistema, como fornecedora de água em quantidade e qualidade, retenção de sedimentos, regularização de vazões de cursos d'água, controle de enchentes e habitat para a biodiversidade (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

O sistema de pagamento por serviços ambientais (PSA) por meio de incentivos à conservação e manutenção dos serviços ambientais é uma alternativa econômica capaz de aumentar o bem-estar de comunidades rurais. O PSA é um instrumento empregado no planejamento espacial de bacias hidrográficas, especialmente no âmbito de serviços ambientais relacionados à água e ao transporte de nutrientes (Guswa *et al.*, 2014).

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) estabelece a bacia hidrográfica como unidade territorial para implantação das políticas dos recursos hídricos e uma de suas diretrizes é a integração da gestão dos recursos hídricos com a do uso do solo (BRASIL, 1987 e BRASIL, 1997).

Diante da demanda legal por planejamento integrado da bacia hidrográfica e da importância da relação entre uso do solo e recursos hídricos, a utilização de técnicas de otimização tem sido comum em estudos ambientais (Lautenbach *et al.*, 2013a), como no planejamento de recursos hídricos (Gaddis *et al.*, 2014), planejamento de unidades de conservação (Williams *et al.*, 2012) e da paisagem, com foco na conservação da biodiversidade (Holzkämper, Lausch e Seppelt, 2006).

Essas técnicas permitem a busca pela melhor solução em situações com objetivos múltiplos e conflitantes, que representam a relação dual de ganho e perda entre os serviços ambientais e o desenvolvimento econômico-social da bacia hidrográfica. A identificação dos arranjos espaciais da paisagem permite uma melhor distribuição dos usos do solo que constituem a paisagem da bacia hidrográfica, que minimizam os impactos no ambiente e promovem o bem estar das comunidades.

O uso de técnicas computacionais flexibilizam a criação de cenários que identificam áreas mais relevantes à conservação ambiental e ao retorno social-econômica dentro da bacia hidrográfica. O planejamento espacial de uso da terra é otimizado pela aplicação da meta-heurísticas algoritmo genético (AGe) em conjunto com a análise multi-critério, e considera variáveis ambientais e econômicas para a tomada de decisões.

## 2. OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um método, baseado em algoritmo genético para o planejamento espacial do uso da terra, com vistas à conservação do solo e água, associado ao retorno econômico de bacias hidrográficas.

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Capacidade de uso da terra

As questões ambientais apresentam cada vez mais importância nas discussões mundiais. De acordo com a FAO (2015), cerca de 30% das áreas mundiais encontram-se degradadas, sendo ameaçada principalmente por erosão, compactação e perda de matéria orgânica. Diversos serviços ecossistêmicos são providos pelo solo, como sequestro de carbono e produção de água, que podem afetar grande parte da população mais vulnerável.

A degradação está associada com o uso intenso do solo por meio de técnicas inapropriadas, assim como a negligência quanto a capacidade suporte de cada solo e da cultura implantada.

Um fator determinante no planejamento adequado do solo são as escolhas das áreas para implantação de culturas, onde áreas com alta aptidão são destinadas a produção agrícola intensificada, enquanto que as áreas de menor aptidão agrícola são utilizadas em atividades de conservação.

O processo de ocupação do solo é fundamental para alcançar a sustentabilidade. O estabelecimento das culturas, suas escolhas e formas de manejo, constituem em fatores determinantes na preservação ambiental e manutenção do solo livre de agentes biológicos e químicos prejudiciais à vida (Santos e Camargo, 1999).

O manejo da vegetação, principalmente por meio de sua retirada, construção de estradas e ocorrência de incêndios florestais, impactam a produção de sedimentos aumentando a quantidade de sedimentos disponíveis para o transporte assim como o aumento do escoamento superficial. A construção de estradas causa mudança na interceptação e do direcionamento do escoamento superficial que afetam a hidrologia da bacia e o aumento da perda de massa (Doten *et al.*, 2006).

A identificação de classes de aptidão no solo permite uma otimização espacial do seu uso (Bertoni e Lombardi Neto, 2005) e fornece benefícios como a conservação do solo e da água, assim como potencializa a produção agropecuária e florestal através da manutenção dos atributos do solo.

A classificação da aptidão das terras é baseada na interpretação das várias características presentes na área, tendo como unidade avaliativa a própria propriedade rural ou mesmo a bacia hidrográfica. Há a indicação dos usos mais apropriados para cada classe, como culturas anuais, perenes, reflorestamento, e exposição das principais limitações dessas áreas.

A legislação estabelece limitações no uso do solo como em áreas de preservação permanente e reserva legal (BRASIL, 2012). Estas áreas estão sujeitas a práticas de manejo específicas, principalmente visando a conservação e devem ser consideradas no processo de planejamento.

O processo de classificação considera principalmente características do solo e do ambiente, como o clima e relevo (Schneider, Giasson e Klamt, 2007). A classificação ocorre pela identificação de limitações no cultivo agrícola na área que podem ser enquadradas como limitações que impedem/dificultam, que aumentem o risco de degradação do solo, que comprometem a produtividade agrícola ou limitações legais. Essas limitações são fatores como declividade acentuada, pequena profundidade efetiva, pedregosidade, deficiência hídrica e baixa capacidade de troca de cátions.

O planejamento apropriado considera fatores físicos-químicos-biológicos do solo assim como fatores econômicos e sociais que estão envolvidos no processo produtivo. Considera as reais condições de aplicação das técnicas escolhidas mantendo sua viabilidade econômica. Por fim, deve-se conscientizar os gestores da terra para que as propostas do planejamento sejam aplicadas corretamente (Rio Grande do Sul, 1983).

A aplicação prática da classificação da capacidade de uso da terra deve considerar os fatores físicos, econômicos e sociais. Os critérios de classificação são: declividade do solo e erodibilidade (relacionado a estabilidade do terreno); fatores relacionados a produtividade do solo, como acidez, fertilidade, umidade; impedimentos no uso de mecanização (pedregosidade, profundidade, presença de erosão e encharcamento) e as variáveis climáticas, especialmente distribuição pluviométrica (Marques, 1971).

A manutenção das informações obtidas por experiência dos agricultores e pela experimentação agrícola são consideradas no estabelecimento apropriado de glebas homogêneas com potencial de uso da terra.

As terras podem ser divididas em três categorias: primeiramente, as que são produtivas sem causar dano a terra; as que são produtivas porém, com a cobertura permanente de

uma vegetação para garantir lucro e proteção do solo; por último, as terras que apresentam condições desfavoráveis sendo inviável a exploração econômica (Marques, 1971).

A categoria de terras que excluem a possibilidade econômica deveriam ser denominadas de impróprias para o cultivo convencional, visto que a exploração econômica ocorre de diferentes formas, como os PSA, atividades como a apicultura, o extrativismo e mesmo o manejo florestal sustentável.

As categorias de uso da terra apresentam uma subdivisão, resultando em oito classes, conforme Marques (1971), Rio Grande do Sul (1983) e Bertoni e Lombardi Neto (2005).

- Classe I: terras cultiváveis, aparentemente sem problemas especiais de conservação;
- Classe II: terras cultiváveis com problemas simples de conservação e, ou, de manutenção de melhoramentos;
- Classe III: terras cultiváveis com problemas complexos de conservação e, ou de manutenção de melhoramentos;
- Classe IV: terras cultiváveis apenas ocasionalmente ou em extensão limitada, com sérios problemas de conservação;
- Classe V: terras adaptadas em geral para pastagens e, em alguns casos, para reflorestamento, sem necessidade de práticas especiais de conservação, são cultiváveis apenas em casos muito especiais;
- Classe VI: terras adaptadas em geral para pastagens e, ou reflorestamento, com problemas em casos especiais de algumas culturas permanentes protetoras do solo;
- Classe VII: terras adaptadas em geral somente para pastagens ou reflorestamento, com problemas complexos de conservação;
- Classe VIII: terras impróprias para cultivo, pastagem ou reflorestamento, podendo servir apenas como abrigo e proteção da fauna e flora silvestres, como ambiente de recreação, ou para fins de armazenamento de água.

Os processos de avaliação da capacidade de uso da terra expõem dúvidas quanto a sua eficiência, pois, em alguns casos, são desconsideradas condições sócio-culturais dos gestores das áreas.

Audeh (2013) avaliou o conhecimento acadêmico na classificação da capacidade de uso da terra, por meio da metodologia proposta por Lepsch et al. (1983), com o conhecimento não acadêmico dos proprietários rurais. Constatou-se que a utilização da terra pelo agricultor (com base em critérios de avaliação como profundidade do solo, textura, compactação, pedregosidade) correspondia ao sugerido pela metodologia de classificação, que confirmam a proximidade do método com a realidade do agricultor.

Apesar de satisfatória, esta análise revelou que em alguns casos há uma sobreutilização da área por parte do agricultor. Além disso, há fatores relacionados à adaptabilidade das plantas que não são consideradas pelas metodologias acadêmicas e que fazem parte da experiência do agricultor.

A metodologia de classificação de uso da terra com auxílio de geotecnologias é empregada em conjunto com visitas de campo para coleta de dados para a identificação de fatores limitantes (Fujihara (2002), Galatti Filho (2006) e Demarchi (2012).

O planejamento de uso do solo em grandes áreas pode ser inviabilizado o uso de metodologias locais completas (avaliando todos o fatores propostos), como descrito por Rio Grande do Sul (1983), Lepsch et al. (1983), Schneider, Giasson e Klamt, (2007). A classificação é realizada apenas com informações de dados de literatura e restrita a alguns critérios, como a metodologia aplicada por Almeida (2014).

A metodologia de classificação pelo estabelecimento prévio de critérios, seguido por amostragens de campo ou pela coleta de informações disponíveis na literatura, se apresenta como mais adaptada à realidade local. É necessário o envolvimento de variáveis sociais e econômicas na classificação do uso do solo que aproxime o processo da realidade dos usuários.

### 3.2 Balanço hídrico

A água possui um ciclo no ambiente, sendo encontrada na atmosfera como vapor, partículas líquidas, gelo ou neve. Em condições favoráveis, ocorre a precipitação. Parte dessa precipitação pode evaporar durante a queda mas também ficar retida na

vegetação, sendo conhecida como interceptação. A fração da precipitação que atinge o solo poderá infiltrar, escoar superficialmente ou mesmo evaporar (Pinto et al. (2007)).

A infiltração é a passagem da água da superfície para dentro do solo. Quando a intensidade da precipitação excede a capacidade de infiltração do solo, a água pode ficar empoeçada e, em seguida, escoar superficialmente. Essa água retida na superfície do solo e do escoamento está sujeita a evaporação. A retirada da umidade do solo pelas plantas (eliminando na forma de vapor na atmosfera) chama-se transpiração, que em conjunto com o processo de evaporação é conhecido como evapotranspiração.

Parte da água que infiltra, se movimenta pelos vazios do solo (movimento chamado percolação) e atinge uma camada saturada que forma o lençol freático. Esse lençol pode encontrar uma vertente e retornar a água à superfície ou mesmo fornecer água aos cursos d'água.

A compreensão dos componentes do balanço hídrico é de extrema importância para o planejamento adequado das bacias hidrográficas e para atender às demandas de consumo da sociedade. As bacias hidrográficas são como unidades socioecológicas onde se encontram as relações entre o clima, o solo, os organismos e os aspectos socioeconômicos, sendo considerada como uma unidade de gestão sócio-ambiental.

O monitoramento dos componentes do balanço hídrico permite inferir sobre o impacto do consumo agrícola, industrial e da população sobre os recursos hídricos. Seu monitoramento é um importante parâmetro de avaliação sobre o impacto da mudança de uso da terra e das mudanças climáticas sobre a disponibilidade dos recursos hídricos e sobre o conhecimento concreto do ciclo hidrológico.

O conhecimento das vazões é importante para a prevenção de catástrofes, como a previsão de enchentes e de períodos de seca dos rios. Adicionalmente, a determinação das vazões servem como referência para o cálculo da vazão de outorga, importante informação para a gestão dos recursos hídricos (BRASIL, 1997).

A drenagem profunda que pode ocorrer após a infiltração é parte responsável pelo suprimento de água durante períodos longos de estiagem e representa a parcela da precipitação que infiltrou no solo e que atinge o curso d'água gradativamente como água subterrânea (Tucci, 2015). Essa variável é representada pelo excedente hídrico resultante do cálculo do balanço hídrico climatológico desenvolvido por Thornthwaite e Mather (1955).

Vários fatores ambientais influenciam a vazão subterrânea em uma bacia hidrográfica. Características do relevo, como a densidade de drenagem e a declividade da bacia, afetam de maneira diferente a vazão. As diferentes coberturas do solo na bacia, com a variação da vegetação (ou sua ausência) afetam a interceptação das chuvas e a infiltração da água no solo, assim como as características do solo (textura e estrutura) (Tucci, 2005).

### 3.3 Perda de solo

O solo é um recurso natural sujeito ao processo de degradação causado pelo homem, principalmente decorrente da transição de vegetações naturais para áreas cultivadas com baixa aplicação de técnicas de conservação. O solo diminui a capacidade de exercer sua função devido à perdas em seus atributos químicos, físicos e biológicos.

Em regiões tropicais, como no Brasil, a perda de solo ocorre principalmente por erosão hídrica, pela perda da camada superficial, pela deformação do terreno, pelos movimentos de massa e deposição (Bertoni e Lombardi Neto, 2005). O escoamento superficial, causado por chuvas intensas, em conjunto com as práticas agrícolas, são responsáveis pela maior parte da degradação do solo (Amorim *et al.*, 2010).

Os principais fatores que afetam a perda de solo são: a erosividade da chuva, a erodibilidade do solo, o fator de comprimento e a inclinação do declive, o fator de uso e manejo, e o fator de práticas conservacionistas (Wischmeier e Smith (1958) citado por Bertoni e Lombardi Neto (2005)).

Estimativas do aporte de sedimentos em bacias hidrográficas podem ser obtidas por meio de equações empíricas que relacionam os fatores que afetam a perda de solo com a quantidade desse aporte. A estimativa correta depende da quantificação de suas variáveis e da calibração de seus parâmetros específicos em cada local de estudo.

Modelos foram elaborados para estimar a perda de solo, dentre eles, os mais utilizados são: a Equação Universal de Perda de Solo (USLE), a Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE) e o modelo Projeto de Predição de Erosão Hídrica (WEPP) (Cecílio *et al.*, 2009). As estimativas de perda de solo são importantes para avaliação da qualidade ambiental, do efeito do manejo e da aplicação de técnicas conservacionistas e mudanças de uso do solo que permitem o planejamento ambiental eficaz pelo direcionamento de ações específicas.

A USLE, desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978), é uma das equações mais utilizadas para estimar de perda de solo no mundo. A equação constitui em cinco fatores: a erodibilidade do solo, a erosividade da chuva, o fator topográfico, o fator de manejo e o fator conservacionista.

Apesar de muito aplicada, a USLE pode apresentar resultados incorretos pelo uso inadequado, principalmente em condições para as quais não foi desenvolvida (Chaves, 2010). Sendo a equação composta por diferentes fatores, os erros advêm de problemas em determinar cada componente, principalmente na ausência de informações do escoamento superficial no fator R (erosividade da chuva), relaciona apenas com características da precipitação (Kinnell, 2010).

Os componentes da equação USLE apresentaram baixa variabilidade espacial, exceto o fator erodibilidade do solo, com variabilidade alta quando comparada aos demais. A perda de solo na área apresentou variabilidade maior que os termos individualizados, o que refletiu em propagação de incertezas por meio da aplicação do modelo (Chaves, 2010).

Ao aplicar os modelos USLE, RUSLE e WEPP em diferentes condições edafoclimáticas no Brasil (tipos de solo, manejo, declividade), Amorim et al. (2010) constataram que todos os modelos superestimaram a perda de solo independente dos valores baixos ou altos. O modelo WEPP apresentou melhor acerto nas predições, sendo recomendado pelos autores a sua utilização em regiões brasileiras.

Cecílio et al. (2009) estimaram a perda de solo pelos modelos RUSLE e WEPP em uma bacia experimental no município de Viçosa (MG). O modelo WEPP superestimou a perda de água, porém com boa estimativa de perda de solo, ainda que inferior à estimativa realizada pelo modelo da RUSLE.

Ao utilizar o valor de perda de solo para quantificar um serviço ambiental gerado em duas microbacias com diferentes usos do solo, Fernandes et al. (2014) constataram que a USLE superestimou a perda, de maneira expressiva, quando compara aos valores medidos no exutório das microbacias. Por conseguinte, houve aumento dos custos para a remoção dos sedimentos que corresponderiam à um valor monetário do serviço gerado na microbacia com maior área de mata nativa.

Modelos de perda de solo podem ser utilizados como indicativos de qualidade ambiental em trabalhos que envolvem o uso de técnicas de SIG, otimização de uso da terra e análises multi-critério (Leh et al. (2013), Yuan et al. (2016), Anache et al. (2018).

### 3.4 Processo analítico hierárquico (AHP)

O planejamento integrado de uma bacia hidrográfica exige o conhecimento de diversas variáveis ambientais, assim como de suas inter-relações, que fornecem maior compreensão da realidade local e das questões que a envolvem.

A análise de decisão multicritério consiste em um conjunto de métodos amplamente utilizada em problemas que envolvam múltiplos objetivos que estão sujeitos à variação de opinião dos tomadores de decisão. O método permite associar variáveis ecológicas, sociais e econômicas (Kaim, Cord e Volk, 2018).

A análise de multicritério é usada na avaliação da aptidão agrícola, no planejamento de bacias hidrográficas e em assentamentos. Apresenta relevância ao abordar problemas complexos relacionados à alocação de áreas e priorizar alternativas de implantação (Zolekar e Bhagat, 2015).

O AHP é um dos métodos inseridos no arcabouço da análise multicritério. O método permite hierarquizar variáveis envolvidas em uma análise e fornecer uma visão global do problema com suas respectivas magnitudes. O AHP é baseada na criação de uma matriz de comparação onde é julgada a importância de cada variável aos pares, que permite gerar prioridades na avaliação, além de dispor do benefício de verificar a consistência do julgamento realizado no processo (Saaty L., 1977).

O método AHP reflete a avaliação realizada por especialistas, o que o torna confiável quanto aos julgamentos. Esta vantagem permite que seja implantado em diferentes condições ou áreas de estudo, reforçando a flexibilização do seu uso.

O AHP pode ser utilizado na avaliação da aptidão da terra (Akinci, Özalp e Turgut, 2013), na solução de problemas de manejo de resíduos sólidos (Achillas *et al.*, 2013), na alocação de fazendas para geração de energia eólica (Al-Yahyai *et al.*, 2012) e na avaliação de susceptibilidade à erosão (Silva *et al.*, 2016). Pode também ser empregado no estudo de vulnerabilidade ambiental de bacias hidrográficas e ser utilizada com técnicas de otimização fornecendo pesos às variáveis que compõem a função multi-objetivo do problema (Santé-Riveira, Crecente-Maseda e Miranda-Barrós, 2008).

### 3.5 Otimização do uso da terra

A alocação espacial dos usos e coberturas do solo é uma tarefa complexa devido à ampla variedade de combinações de usos que podem ser utilizados no planejamento regional da paisagem (Stewart, Janssen e Herwijnen, Van, 2004). O processo de otimização pode ser aplicado à múltiplos objetivos que envolvam interesses conflitantes, como os fatores ambientais (conservação de água, solo e biodiversidade), econômicos (por meio da geração de renda) e questões técnicas (Memmah *et al.*, 2015).

A bacia hidrográfica é composta por um mosaico de diferentes usos do solo, como os cultivos agrícolas, as áreas de conservação, as cidades, os parques industriais e os corpos hídricos. As mudanças de uso do solo são uma das principais causas de perdas de serviços ambientais, como a redução da biodiversidade, a perda de nutrientes e a diminuição da disponibilidade de água (Münier, Birr-Pedersen e Schou, 2004).

Diversos serviços ambientais são potencializados com a correta determinação da ocupação do solo, como o aumento de vazões e a redução de perda do solo, porém há o desafio em se alocar os usos do solo dentro das bacias hidrográficas para que esses serviços sejam otimizados (Memmah *et al.*, 2015).

A alocação de uso do solo otimizada é avaliada pela relação de ganho e perda entre os serviços ecossistêmicos o que representa a difícil tarefa de buscar um equilíbrio entre o provimento desses serviços e a manutenção de uma paisagem equilibrada (Kaim, Cord e Volk, 2018).

A criação de cenários dentro da zona rural permite a determinação de áreas utilizadas para o cultivo de algumas espécies agrícolas e florestais, além da determinação de áreas com potencial de conservação para fins de restauração dos ecossistemas (Stewart, Janssen e Herwijnen, Van, 2004).

A otimização avalia as alternativas concorrentes dentro de um limite de recursos (Rothman e Mays, 2013). O uso da técnica de otimização na alocação de cenários permite aos tomadores de decisão explorar uma grande variedade de combinações de usos do solo. Além disso, considera múltiplos objetivos que envolvem interesses conflitantes como os fatores ambientais (conservação de água, solo e biodiversidade) e os fatores econômicos (por meio da geração de renda) e questões técnicas (Memmah *et al.*, 2015).

A complexidade do planejamento do uso da terra impulsionou a aplicação de diferentes tipos de algoritmos de otimização que outrora baseavam-se na aplicação de programação linear (com objetivo único) para a solução de alocação de uso do solo com número reduzidos de variáveis (Sokouti e Nikkami, 2017).

Maiores investimentos, a complexidade do problema, os objetivos conflitantes e o grande número de restrições em conjunto com a utilização dos sistemas de informação geográficas, de maneira interativa, demandaram a utilização de novos métodos de otimização (Stewart, Janssen e Herwijnen, Van, 2004).

O AGe é um método de otimização estocástica, classificada como metaheurística, em que as restrições ou parâmetros dependem de variáveis aleatórias. Este método é reconhecido por sua capacidade de solucionar problemas altamente complexos, como no caso de planejamento espacial de uso e ocupação do solo (Holzkämper, Lausch e Seppelt, 2006).

AGe é um mecanismo de inteligência computacional de busca extremamente eficiente, com objetivo de varrer o espaço de soluções e encontrar soluções próximas da solução ótima (não encontra uma única solução ideal). As soluções encontradas são consideradas boas, porém nem sempre são possíveis de serem replicadas devido ao grau de aleatoriedade presente no processo de otimização.

Os algoritmos são considerados de simples implementação e são utilizados quando os demais algoritmos são excessivamente lentos e quando não houver solução para o processo de otimização. A escolha do método de algoritmo genético deve ser considerada de acordo com as características do modelo determinado (Linden, 2008).

O AGe é uma técnica de otimização global com sistema de busca aleatória-guiada baseado no mecanismo da seleção natural. Cria-se uma população inicial que é submetida aos operadores genéticos. Após a avaliação da qualidade do indivíduo em solucionar o problema, gera-se um novo indivíduo (por seleção, recombinação) com características possivelmente melhores para a solução do problema. O fato do AGe buscar por indivíduos (soluções) melhores, como no processo de seleção natural, impede que a busca seja suspensa ao encontrar um indivíduo instantaneamente melhor. O sistema de busca evita que a solução encontrada seja um ótimo local, possibilitando a busca pelo ótimo global ou o mais próximo possível (Linden, 2008).

O processo computacional pode levar dias ou mesmo semanas devido ao grande número de combinações existentes, podendo representar uma limitação computacional para o planejamento espacial do uso do solo (Arabi, Govindaraju e Hantush, 2006).

A estratégia de otimização multi-nível foi desenvolvida para superar o excesso de tempo demandado na otimização espacial (Cibin e Chaubey, 2015). O planejamento da bacia hidrográfica é dividido primeiramente na otimização de suas microbacias e, posteriormente, da área de toda a bacia. Desta forma, a solução de problemas de otimização é três vezes mais rápida que a abordagem utilizando a bacia toda diretamente.

AGes foram utilizados na otimização para identificar as melhores práticas de uso do solo, com conflito entre as diversas culturas para a produção de bioenergia e alimento. Utilizando-se da integração entre técnicas de otimização e uso de modelos hidrológicos é possível avaliar o melhor cenário de uso do solo diante de múltiplos objetivos, como qualidade da água e vazão mínima (Lautenbach *et al.*, 2013b).

Há o conflito de interesse em atender as demandas de crescimento atuais às custas da perda de áreas para a conservação, que caracteriza um problema de múltiplos objetivos no âmbito dos recursos hídricos. A otimização do suprimento de água foi realizada pela implementação de algoritmos genéticos, o que evidencia a eficiência da técnica em solucionar problemas complexos (Rothman e Mays, 2013).

Memmah *et al.* (2015) apresentaram uma revisão de 50 artigos abordando o uso de metaheurística em temas relacionados com a otimização do uso agrícola do solo. Desse estudo, conclui-se que: o sucesso da utilização da metaheurística depende do problema em estudo, e que em geral são capazes de fugir de ótimos locais e chegar mais perto do ótimo global; a complexidade dos problemas de alocação de uso do solo aumentou, fazendo-se necessário o uso de métodos que representem os múltiplos atores tomadores de decisão no balanço entre os seus interesses conflitantes; e, ainda, que os desafios futuros são a utilização de diferentes metaheurísticas ou mesmo o uso conjunto com outras técnicas de otimização.

### 3.6 Pagamento por serviços ambientais

A exploração de recursos naturais com a finalidade de suprimento das demandas da sociedade tem levado à expansão de áreas cultivadas e, conseqüentemente, degradação

de ambientes naturais, além de afetar a capacidade do ecossistema em sustentar a produção de alimentos e manter os recursos hídricos e florestais (Foley *et al.*, 2005).

Os serviços ambientais são os benefícios que a população humana obtém direta ou indiretamente das funções ecossistêmicas (Costanza *et al.*, 1997) e devem ser analisados na relação entre homem-ambiente em um contexto social e natural.

Os serviços ambientais podem ser classificados como (Millennium Ecosystem Assessment, 2005):

- Serviço de suporte: são os serviços que permitem que os demais serviços possam ocorrer, sendo observado geralmente de maneira indireta, como a ciclagem de nutrientes, formação do solo, produção primária e a biodiversidade;
- Serviço de provisão: se refere aos produtos obtidos diretamente da natureza e que beneficiam a sociedade, como alimentos, água, madeira, fibra e energia;
- Serviço de regulação: compreende os serviços oriundos da regulação do ecossistema, como a regulação do clima, controle de enchentes, qualidade da água, controle da erosão por meio da estabilização do solo, impedindo o transporte de sedimentos e regulação das vazões máximas e de base;
- Serviço cultural: são benefícios não materiais que a sociedade adquire da natureza como valores paisagísticos, espiritual, educacional e recreativo.

O sistema de pagamento por serviços ambientais é uma alternativa econômica para suporte no planejamento ambiental diante do cenário de degradação e perda dos serviços ambientais. Este sistema estabelece uma relação entre os beneficiários que se comprometem a pagar aos provedores do serviço do ecossistema na condição em que esses mantenham os serviços ambientais avaliados preservados (Engel, Pagiola e Wunder, 2008).

O PSA é a transação voluntária entre os usuários e os provedores do serviço ambiental que está condicionada à regras previamente acordadas sobre o manejo dos recursos naturais que causarão externalidades ambientais positivas (Wunder, 2015).

Há a necessidade de quantificar de maneira apropriada o recurso natural para o monitoramento e garantia de seu suprimento, além de estabelecer as quantidades de serviços a serem ofertados e as condições que os mesmos devem ser estabelecidos

através de indicadores simples o quais se relacionem ao serviço ambiental pretendido no processo de PSA (Manfredini, Guandique e Morais, 2014).

A valoração do serviço ambiental é obtida pela sua utilidade direta ou indireta, ou mesmo, associada à valores ecológicos intrínsecos à ele (Andrade e Romeiro, 2009). O serviço ambiental relacionado à produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica é de difícil quantificação e valoração sujeito a variação quando aplicados diferentes métodos (Chaves, 2010b). A Agência Nacional de Águas (2012) relaciona o serviço ambiental ao controle da poluição difusa, que seria representada pela perda de nutrientes e defensivos, enquanto Fernandes et al. (2014) associa pelo custo de retirada de sedimentos em estações de abastecimento de água.

No Brasil existem iniciativas de implantação de programas de pagamento de serviços ambientais principalmente relacionados aos recursos hídricos. Destaca-se o programa “Produtor de água” desenvolvido pela Agência Nacional de Água (ANA) que incentiva a preservação de áreas prioritárias para conservação de recursos hídricos em propriedades rurais.

O programa Produtor de Água é baseado em ações que visam a diminuição dos processos erosivos e de assoreamento por meio da implantação de técnicas conservacionistas. Estas ações tem o objetivo de produzir água em qualidade e quantidade nas propriedades rurais (Agência Nacional de Águas, 2012).

No estado do Espírito Santo está em funcionamento o Programa Reflorestar, que visa realizar o pagamento de serviços ambientais à produtores rurais. Este projeto favorece a conservação da natureza, por meio da condução da regeneração natural ou condução de práticas conservacionistas, como sistemas agroflorestais e manejo florestal (ESPÍRITO SANTO, 2017).

A implantação de PSA é uma importante ferramenta de incentivo à conservação dos recursos naturais (valorando as externalidades positivas), considerada no planejamento ambiental que contribui para o bem estar da sociedade.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Método proposto

O método proposto consiste na utilização da técnica de otimização para o planejamento espacial de usos do solo visando o incremento dos serviços ambientais e retorno econômico ao produtor. Assim, este trabalho tem uma abordagem com múltiplos objetivos no qual se aplica AGe para buscar as melhores configurações de uso da terra considerando variáveis ambientais e econômicas.

Para a escolha da melhor configuração do uso do solo foi considerado o efeito conjunto das variáveis ambientais perda de solo (PS) e excedente hídrico (EXC), e da variável econômica renda bruta (RE), representados por uma função objetivo (FO). Neste caso, há o objetivo de buscar soluções cujos usos do solo apresentem as menores taxas de PS e as maiores quantidades de EXC e RE.

Como são utilizadas variáveis que possuem diferentes unidades, é possível (à critério do usuário) fazer a padronização das mesma para permitir o estudo de seus valores variando de 0 à 1. Desta forma, é possível avaliar o efeito de cada variável no conjunto de variáveis analisadas.

As três variáveis se relacionam por meio de uma equação na qual é possível estabelecer pesos diferentes para cada uma delas. Estes pesos representam diferentes estratégias determinadas pelo planejamento ambiental de acordo com a ênfase estabelecida pelo tomador de decisão. Para a determinação dos pesos atribuídos a cada variável foi realizada uma análise multicritério.

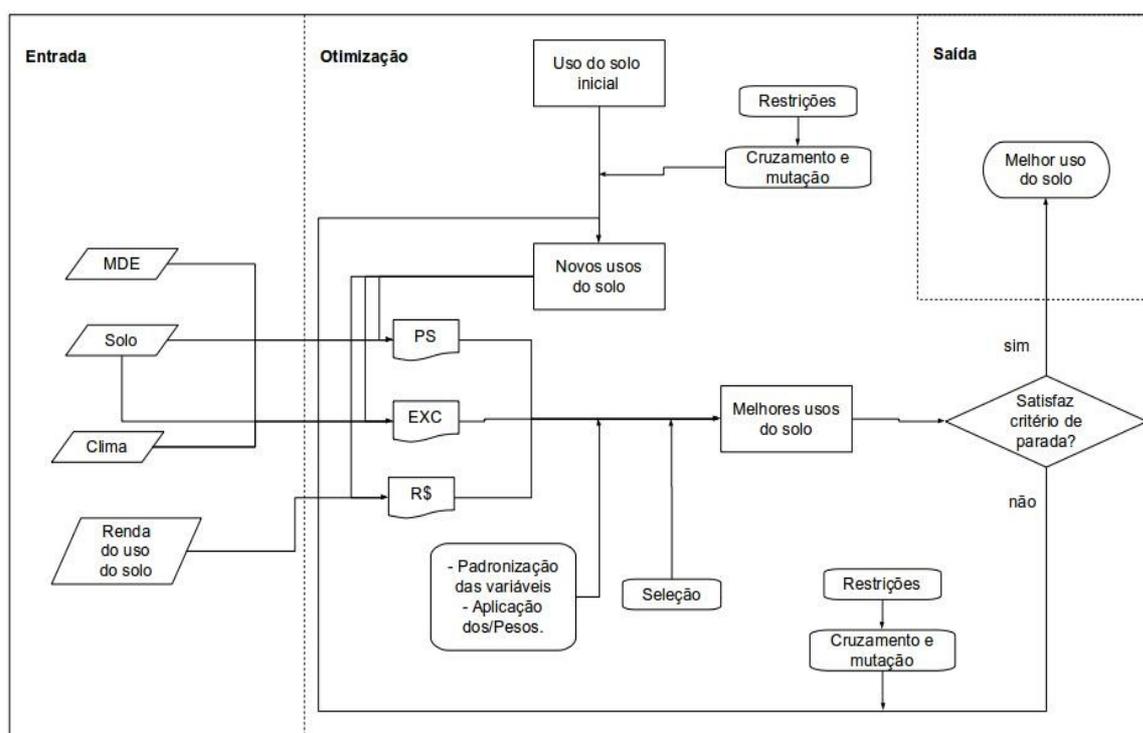
O método permite ao usuário a criação de restrições espaciais quanto que proíbe certos tipos de uso do solo em determinados locais. O usuário também pode determinar que alguns usos permaneçam inalterados.

Neste trabalho foram considerados cinco usos do solo que poderiam ser estabelecidos na microbacia, respeitando as restrições pré-estabelecidas. Os usos do solo são: mata nativa (MN), pastagem (PA), cafeicultura (CA), eucalipto (EU) e agricultura (AG), este último representando culturas anuais.

A Figura 1 apresenta um fluxograma com a descrição geral do método. São apresentados os arquivos de entrada: dados de altitude, solo, clima e renda bruta das culturas. No processo de otimização é gerado um mapa de uso solo (que respeita as restrições

espaciais) e com o suporte dos dados de entrada é feito o cálculo das variáveis PS, EXC, RE e da FO. Esse último é armazenado e o processo se repete, gerando um novo uso do solo, até que um critério de parada seja atingido. Ao final do processo de otimização é apresentado o resultado que gerou o maior valor de FO, ou seja, o mapa de uso do solo otimizado respeitando as restrições espaciais e as condições determinadas pelo planejamento ambiental (representada pelos pesos atribuídos a cada variável de interesse).

Figura 1 - Fluxograma geral da metodologia proposta.



Fonte: o autor.

A espacialização dos dados é feita no formato de grades (raster) onde cada pixel é ocupado por um tipo de uso do solo. Todo o processamento do método é desenvolvido à nível de pixel, onde são calculadas as variáveis, que resultam em um valor final para toda a área de estudo.

A seguir são apresentadas todas as etapas do método com detalhamento, assim como sua aplicação em quatro estudos de casos que são de microbacias localizadas nos municípios de Alegre (MbAL), Santa Leopoldina (MbSL), São Mateus (MbSM) e Linhares (MbLI). Essas regiões representam características distintas quanto ao clima, relevo e uso inicial do solo.

#### 4.1.1 Elaboração do modelo matemático

O problema em questão consiste em encontrar uma configuração espacial otimizada, em relação ao uso da terra, para determinada microbacia. Leva em consideração três objetivos que se sujeitam à restrições espaciais determinadas na própria área de estudo.

Desta forma, o problema foi representado por meio de uma matriz tridimensional. A primeira dimensão representa o objetivo a ser minimizado, neste caso a perda de solo, seguido da maximização do excedente hídrico e da maximização da renda bruta na microbacia.

O processo de otimização, como parte do método proposto neste trabalho, é composto pelos seguintes objetivos:

- Minimizar a perda de solo ( $t\ ha^{-1}ano^{-1}$ )
- Maximizar o excedente hídrico ( $mm\ ano^{-1}$ ).
- Maximizar a renda bruta obtida ( $R\$ ha^{-1}ano^{-1}$ ) pelas atividades agrícolas e pela remuneração da área de mata nativa na microbacia de estudo.

Por se tratar de múltiplos objetivos, a função objetivo pode ser descrita como:

Maximizar:

$$FO = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\alpha V_{i,j} + \beta U_{i,j} + \gamma Z_{i,j}) \cdot X_{i,j} \quad (1)$$

em que  $V$ ,  $U$  e  $Z$  referem-se ao valores das variáveis avaliadas (renda bruta, excedente hídrico e perda de solo);  $i$  indica o número da unidade geográfica individualizada na bacia (*pixel*), sujeita a receber um tipo de uso do solo;  $n$  é o número total de unidades presentes na bacia hidrográfica;  $j$  é o número referente ao uso do solo;  $m$  é o número total de usos do solo que disponíveis para utilização na bacia;  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são os pesos referentes a cada variável representada na função;  $X_{ij}$  é um valor binário que representa se a cultura está ou não em uma unidade  $i$  com o uso do solo  $j$ .

Sujeito à:

$$\sum_{j=1}^m X_{i,j} = 1 \quad \forall i=1\dots n \quad (2)$$

$$X_{i,j} \in \{0,1\} \quad \forall i=1\dots n, j=1\dots m \quad (3)$$

As restrições 2 e 3, representadas por  $X_{ij}$ , indicam que apenas 1 tipo de uso do solo ocupa determinada unidade  $i$ . Os pesos variam de 0 à 1, com o somatório dos pesos dos 3 objetivos avaliados igual à 1 quando ocorreu a padronização dos mesmos, caso contrário, podem assumir qualquer valor.

#### 4.1.2 Implementação do algoritmo

Para a solução do modelo proposto, foi apresentado um método heurístico baseado em AGe. A implementação foi feita em ambiente R (R Core Team, 2018) de código aberto, o que permite ao usuário total liberdade de alteração e compreensão do método.

##### 4.1.2.1 Descrição geral

A implementação do AGe aplicado na alocação de usos da terra é feita considerando cada indivíduo como um vetor que representa a configuração da paisagem, ou seja, é uma representatividade de uma microbacia. Os genes desse indivíduo são representados por cada pixel que compõe a microbacia, o qual pode receber um uso da terra. Sendo assim, cada novo indivíduo formado no processo representa um cenário de uso do solo onde, para cada pixel (gene) é atribuído um uso de solo específico.

Neste trabalho foram considerados 5 tipos de uso de solo (mata nativa, pastagem café, eucalipto e agricultura). A microbacia é representada como sendo um indivíduo do modelo, constituindo-se de  $u$  células correspondentes à sua área; e a geração de um novo indivíduo está sempre sujeita à avaliação da restrição espacial.

A implementação do AGe começa com a geração de uma população inicial (de forma aleatória), seguida do cálculo das variáveis e o ordenamento dos indivíduos. A população inicial é composta por vários indivíduos, os quais são representações de diferentes usos da terra na microbacia.

O critério de parada é verificado e, caso seja atendido, o processo é interrompido e fornecido o resultado final. Caso contrário, é feita a seleção dos indivíduos para a realização das etapas de cruzamento seguido da mutação. Em sequência, tem-se a geração de uma nova população que é avaliada e ordenada com a nova checagem do critério de parada. O ciclo permanece em execução enquanto o critério de parada não é atingido (Figura 1).

O critério de parada utilizado foi o número de gerações produzidas. O processo foi interrompido quando atingia 3000 gerações e o tempo de execução variou de acordo com o computador utilizado e a microbacia avaliada. O número de gerações foi escolhido após vários testes observando o tempo gasto na análise e o incremento do valor da FO em relação ao aumento do número de gerações.

#### 4.1.2.2 Restrição espacial

A geração de indivíduos (que representam uma paisagem) é feita sempre com a possibilidade de duas restrições espaciais: a primeira se refere a classe de uso, estabelecida de acordo com a classe de declividade, e a segunda de acordo com a determinação particular do usuário. Nesta última restrição o usuário deve fornecer um arquivo matricial indicando os lugares onde podem ou não ocorrer mudanças de uso do solo ou mesmo indicar qual dos usos da terra não poderão ser modificados no decorrer do processo de otimização.

Para exemplificar tem-se uma microbacia hipotética representada por 10 *pixels* (Figura 2). A mesma é convertida em um vetor (indivíduo - P) que representa a sua configuração. Neste caso, cada *pixel*, ocupado por um único uso do solo, representa um gene do indivíduo P.

Considerando que esta microbacia (Figura 2) foi classificada de acordo com as classes de uso do solo apresenta as classes contidas no vetor CL (vetor abaixo). Supondo que no vetor CL o número 3 representa a classe 3, onde é possível apenas alocar os usos do solo do tipo 1 ou 4 (determinação feita pelo usuário). Assim, ao ser gerado um novo indivíduo, a posição 9 da microbacia P só pode receber os usos da terra 1 ou 4 devido à restrição apresentada no gene  $CL_9=3$  (classe 3).

$$CL = [1,1,1,2,2,3,3,3,3,3]$$

Outra consideração seria supor que não seja permitido a mudança do uso do tipo 1, ou seja, as áreas que inicialmente são ocupadas pelo uso 1 não podem ser alteradas. Diante deste objetivo, o usuário deve fornecer uma arquivo matricial binário onde o valor 1 representa a posição na qual o uso não pode mudar, e 0 significa que pode haver mudança. Este arquivo é convertido também em vetor e utilizado como restrição espacial ao modelo.

Por exemplo, tem-se o seguinte vetor de restrição, MR, considerando a paisagem P apresentada anteriormente. Desta forma, os genes que apresentam valor 1 serão mantidos como uso da terra 1 (as posições  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_9$  e  $P_{10}$ ) e os demais poderão variar de acordo com a restrição de classe de uso pré-determinado (CL).

$$MR = [1,1,0,0,0,0,0,0,1,1]$$

Figura 2 - Representação hipotética de uma microbacia contendo 10 pixels com os respectivos usos do solo (valores de uso do solo podem variar de 1 à 5), seguida da sua representação vetorial P.

1	1	2
3	4	
4	5	5
1	1	

$$P = [1,1,2,3,4,4,5,5,1,1]$$

Fonte: o autor.

#### 4.1.2.3 Inicialização

A geração da população inicial ocorre de maneira aleatória, sendo respeitadas as restrições espaciais de uso da terra. Na fase inicial é determinado o número de indivíduos que farão parte da população inicial. Neste trabalho utilizou-se uma população com 10 indivíduos.

#### 4.1.2.4 Cruzamento

O processo de cruzamento consiste na escolha de dois indivíduos e, a partir deles, gera-se dois novos indivíduos diferentes. A geração de novos indivíduos ocorre determinando

primeiramente o número de cortes que serão feitos, podendo ser 1 ou 2, de acordo com o exemplo apresentado abaixo, seguido pelo local onde estes cortes devem ocorrer. O local do corte é determinado de maneira aleatória.

Considerando os indivíduos P1 e P2.

$$P1 = [1,1,2,3,4,4,5,5,1,1]$$

$$P2 = [2,2,2,3,4,1,1,1,1,1]$$

Caso seja determinado um cruzamento na posição 7, tem-se como resultado os indivíduos filhos F1 e F2:

$$F1 = [1,1,2,3,4,4,5,1,1,1]$$

$$F2 = [2,2,2,3,4,1,1,5,1,1]$$

Enquanto que o cruzamento em duas posições, 3 e 7, resultaria os indivíduos F3 e F4:

$$F3 = [1,1,2,3,4,1,1,1,1,1]$$

$$F4 = [2,2,2,3,4,4,5,5,1,1]$$

Para diminuir a fragmentação da paisagem foi implementada uma restrição utilizada no momento do cruzamento. Esta restrição estabelece que o cruzamento entre dois indivíduos ocorre quando o número de vizinhos do ponto de corte no indivíduo 2 for igual ou superior a um escalar pré definido de usos iguais ao ponto de corte no indivíduo 1.

Considerando, por exemplo, que o parâmetro numVizinho (ver descrição na Tabela 1) seja 3, desta forma poderia ocorrer o cruzamento entre os indivíduos P1 e P2 no ponto hachurado escuro, uma vez que o indivíduo P2<sub>23</sub> (linha 2, coluna 3) possui 4 vizinhos com o mesmo uso da terra que o P1<sub>23</sub> (Figura 3).

#### 4.1.2.5 Mutação

O processo de mutação foi implementado com duas possibilidades. Na primeira opção ocorre a mudança no gene selecionado assim como nos vizinhos do mesmo, respeitando todas as restrições de mudança (classe de uso e matriz de restrição). A segunda opção ocorre apenas quando há mudança do uso do solo no gene selecionado para sofrer a mutação.

Figura 3 - Representação hipotética da condição de cruzamento entre 2 indivíduos (P1 e P2) com os respectivos usos do solo (valores de uso do solo podem variar de 1 à 5).

P1					P2				
1	2	3	4	4	2	2	3	4	4
1	1	3	4	4	2	1	1	3	4
1	1	2	4	4	1	1	3	3	5
1	5	5	4	4	1	2	2	4	5

Fonte: o autor.

Considerando o indivíduo P1 apresentado anteriormente (Figura 3), caso o gene P1<sub>23</sub> sofresse mutação, o resultado seria o indivíduo P3 (considerando que houve mudança do uso do solo tipo 3 para 1 e que as restrições de classe foram respeitadas), conforme apresentado na Figura 4:

Figura 4 - Representação hipotética do indivíduo P3 que sofreu mutação com os respectivos usos do solo (valores de uso do solo podem variar de 1 à 5).

P3				
1	1	1	1	4
1	1	1	1	4
1	1	1	1	4
1	5	5	4	4

Fonte: o autor.

O algoritmo implementado apresenta vários parâmetros que podem ser configurados de acordo com o interesse do usuário e das particularidades da região estudada. Os parâmetros e suas descrições são apresentados na Tabela 1, assim como os valores utilizados neste trabalho para aplicação do método. A configuração utilizada dos parâmetros foi a mesma para as quatro microbacias.

Tabela 1 - Parâmetros do AGE utilizados na implementação do método com os respectivos valores aplicados.

Parâmetro	Descrição	Valor utilizado
Tpop	Define o tamanho da população	10
tpopfilho	Define o tamanho da população de filhos que é gerada no cruzamento.	20
percent_mutacao	Número de genes que sofrerão mutação (valores em porcentagem).	0.10%
nCorte	Número de cortes que podem ocorrer no cruzamento. 1 = ocorre corte em apenas 1 ponto; 2 = ocorre corte em 2 pontos.	2
mudaVizinho	Condição que determina se ocorre mudança também nos vizinhos ao gene que sofrerá mutação (1 = ocorre mudança também no vizinho; 2 = ocorre mudança apenas no gene a sofrer mutação).	1
numVizinho	Determina o número de vizinhos que são considerados para que o cruzamento ocorra na posição daquele gene.	3

Fonte: o autor.

#### 4.1.3 Variáveis utilizadas

##### 4.1.3.1 Cálculo da perda de solo

A PS foi estimada pelo uso da Equação Universal de Perda do Solo revisada (EUPS), proposta por Wischmeier e Smith (1978), conforme Equação 4. Para cada fator apresentado na equação foi criado um arquivo matricial.

$$PS = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (4)$$

Em que:

PS é a perda de solo calculada em  $t \text{ ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ ; R é o fator erosividade da chuva; K é o fator erodibilidade do solo; LS é o fator topográfico referente ao comprimento e grau de declive; C e P são fatores relacionados ao uso/manejo do solo e às práticas conservacionistas, respectivamente.

#### 4.1.3.2 Cálculo do excedente hídrico

Os dados de precipitação pluviométrica e evapotranspiração potencial diários utilizados neste trabalho foram extraídos de (Xavier, King e Scanlon, 2015), considerando um período de 35 anos (01/01/1981 à 31/12/2015). Os dados climáticos foram extraídos de uma grade de dados com resolução espacial de 0,25°x 0,25° e a referência espacial utilizada para extração dos dados foram as coordenadas geográficas das estações automáticas que se encontravam próximas da área de interesse do estudo. Como se trata de dados interpolados, buscou-se identificar uma microbacia próxima à localização da estação onde se espera melhor representatividade dos dados.

Os valores de precipitação e evapotranspiração foram utilizados no cálculo do EXC por meio do balanço hídrico sequencial diário em cada microbacia.

#### **Cálculo da precipitação efetiva**

Com os dados de precipitação foi feito o cálculo da precipitação efetiva descontado o escoamento superficial (ES) da precipitação (Equações 5, 6 e 7). O cálculo do escoamento superficial foi feito pelo método do Número da Curva (NC) desenvolvido pelo Soil Conservation Service (1972) e apresentado em detalhes por Pruski, Brandão e Silva (2014). O método NC calcula a lâmina escoada (em mm) utilizando dados de precipitação, tipo e uso do solo por meio das Equações 5, 6 e 7. Nesta abordagem o ES só ocorre quando  $PT > 0,2S$  onde PT é a precipitação total (mm) e S é a infiltração potencial (mm).

$$ES = \frac{(PT - 0,2S)^2}{(PT + 0,8S)} \quad (5)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (6)$$

$$P_{ef} = PT - ES \quad (7)$$

Para utilização do método NC é necessário obter o valor de CN, que depende do uso do solo, do tipo de solo (relacionado ao grupo hidrológico que o mesmo se encontra) e da umidade antecedente.

No método NC os solos são classificados de acordo com o grupo hidrológico. Estes grupos correspondem à uma variação na taxa de infiltração e no potencial de escoamento

que os diferentes tipos de solo apresentam. Estes são classificados como solo do tipo A, B, C e D. Solos do tipo A apresentam baixo potencial de escoamento e alta taxa de infiltração enquanto que solos do tipo D, apresentam elevado potencial de escoamento e baixa taxa de infiltração.

Para utilizar os valores de CN é necessário consultar tabelas que relacionam o uso do solo, com o tipo do solo (A, B, C ou D) e condição de umidade antecedente. A condição de umidade antecedente de um dia é obtida somando-se os valores da precipitação dos cinco dias anteriores a este.

Os valores encontrados nas tabelas de referência se referem à condição de umidade AMC II. Desta forma é necessário corrigir os valores de CN de acordo com a umidade antecedente apresentada no momento da avaliação, conforme apresentado por Pruski, Brandão e Silva (2014).

### **Cálculo da evapotranspiração da cultura (Etc)**

Os valores de ETc foram obtidos conforme Equação 8.

$$ETc = ET_o \cdot kc \quad (8)$$

Em que: *ETc* – evapotranspiração da cultura; *ETo* – evapotranspiração potencial; *kc* – coeficiente da cultura.

### **Cálculo do balanço hídrico sequencial diário**

O cálculo do balanço hídrico sequencial foi realizado de acordo com Thornthwaite e Mather (1955), apresentado por Pereira, Angelocci e Sentelhas (2002).

Para realização do balanço hídrico se faz necessário o valor da CAD (capacidade de água disponível), que relaciona a quantidade de água que pode ser acessada pelo sistema radicular presente naquela fração de solo. O valor da CAD para cada uso do solo foi obtido pela multiplicação dos respectivos valores de Z (profundidade do sistema radicular do uso do solo em questão) pelos valores da CAD unitária referente a cada tipo de solo onde ela está estabelecida (Equação 9).

$$CAD_{uso} = Z_{uso} \cdot CAD_{unitária} \quad (9)$$

#### 4.1.3.3 Cálculo da renda bruta

O cálculo da renda bruta, para a área total estudada, considera os valores individualizados de cada cultura obtidos da literatura. Esses valores representam uma média geral para cada município onde se encontrava a microbacia estudada.

#### 4.1.4 AHP- Saaty

O resultado do processo de otimização está sujeito aos pesos que são atribuídos às variáveis estudadas. Sendo assim, faz-se necessário um bom conhecimento desses pesos por parte do programador para entender a relação entre as variáveis de interesse. Para evitar completa subjetividade na determinação dos pesos pode-se utilizar de outras técnicas como suporte para o planejamento ambiental como a análise multicritério.

Assim, para representar a relação entre as variáveis consideradas nesse estudo, foi aplicada a metodologia AHP (sigla em inglês), desenvolvido por Saaty (1977). Essa metodologia evita que a escolha dos pesos aplicados no processo de otimização seja feita de maneira aleatória, seguindo alguns passos preestabelecidos conforme descrito a seguir:

**1º Passo:** criação da matriz de comparação dos critérios, em pares, atribuindo os valores de acordo com a indicação de magnitude apresentada na Tabela 2. Essa etapa é feita pelo usuário quando é avaliado o problema e são levantadas as relações de importâncias (julgadas por ele) entre as variáveis que o influenciam, constituindo desta forma a matriz de comparação  $A=[a_{ij}]$ . Assim, a matriz A mostra a preferência comparada entre os critérios representada pelos elementos  $a_{ij}$  (Equação 10).

$$A=[a_{ij}]=\begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \cdots & a_{2j} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1j} & 1/a_{2j} & \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \cdots & 1/a_{in} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

**2º passo:** a matriz de comparação obtida no passo anterior é normalizada dividindo-se o elemento da matriz de comparação pelo somatório da respectiva coluna.

**3º Passo:** ao final, o valor dos pesos para cada critério é obtido pela soma da linha da matriz normalizada dividida pelo número de critérios utilizados na avaliação (neste caso igual à 3). Os pesos finais variam de 0-1, sendo o seu somatório igual à 1.

**4º Passo:** o julgamento dos critérios deve ser verificado quanto à sua consistência por meio do cálculo do Índice de Consistência (IC), seguido do cálculo da Razão de Consistência (RC) de acordo com Saaty (1977). Para que a avaliação seja considerada lógica o valor de RC deve ser inferior a 0.10 (Equações 11 e 12) .

$$IC = (\Lambda_{max} - n) / (n - 1) \quad (11)$$

$$RC = IC / IR_{tab} \quad (12)$$

Onde  $n$  é o número de critérios avaliados na análise;  $IR_{tab}$  é o índice de inconsistência aleatória (apresentado em revisão por Alonso e Lamata (2006)) ;  $\Lambda_{max}$  é o autovalor máximo da matriz de comparação.

Tabela 2 - Escala para comparação dos critérios em pares.

Intensidade importância	de Definição	Explicação
1	Importância equivalente	Os dois critérios contribuem de maneira igual ao objetivo
3	Importância fraca de um critério sobre o outro.	Julgamento favorece levemente um critério em relação ao outro
5	Forte ou essencial importância	Julgamento favorece fortemente um critério em relação ao outro
7	Importância demonstrada	Julgamento favorece fortemente um critério em relação ao outro e sua dominância é observada na prática
9	Importância absoluta	A evidencia de favorecimento de um critério sobre o outro é a maior possível
2,4,6,8	Valores intermediários entre dois julgamentos adjacentes	

Fonte: Adaptado de Saaty (1977).

## 4.2 Estudo de caso

### 4.2.1 Área de estudo

Com o intuito de aplicar e avaliar o método desenvolvido, conduziram-se quatro estudos de casos em microbacias hidrográficas localizadas no estado do Espírito Santo nos municípios de Alegre (MbAL), Santa Leopoldina (MbSL), São Mateus (MbSM), e Linhares (MbLI), conforme apresentado na Figura 5.

As microbacias se encontram inseridas no bioma Mata Atlântica. Quanto ao clima, a MbAL apresenta clima do tipo Cfa e temperatura média de 21°C. A MbSL apresenta clima do tipo Cf, com temperatura média de 17°C. As microbacias MbSM e MbLI apresentam clima do tipo Am com temperaturas média de 23°C (Alvares et al., 2013).

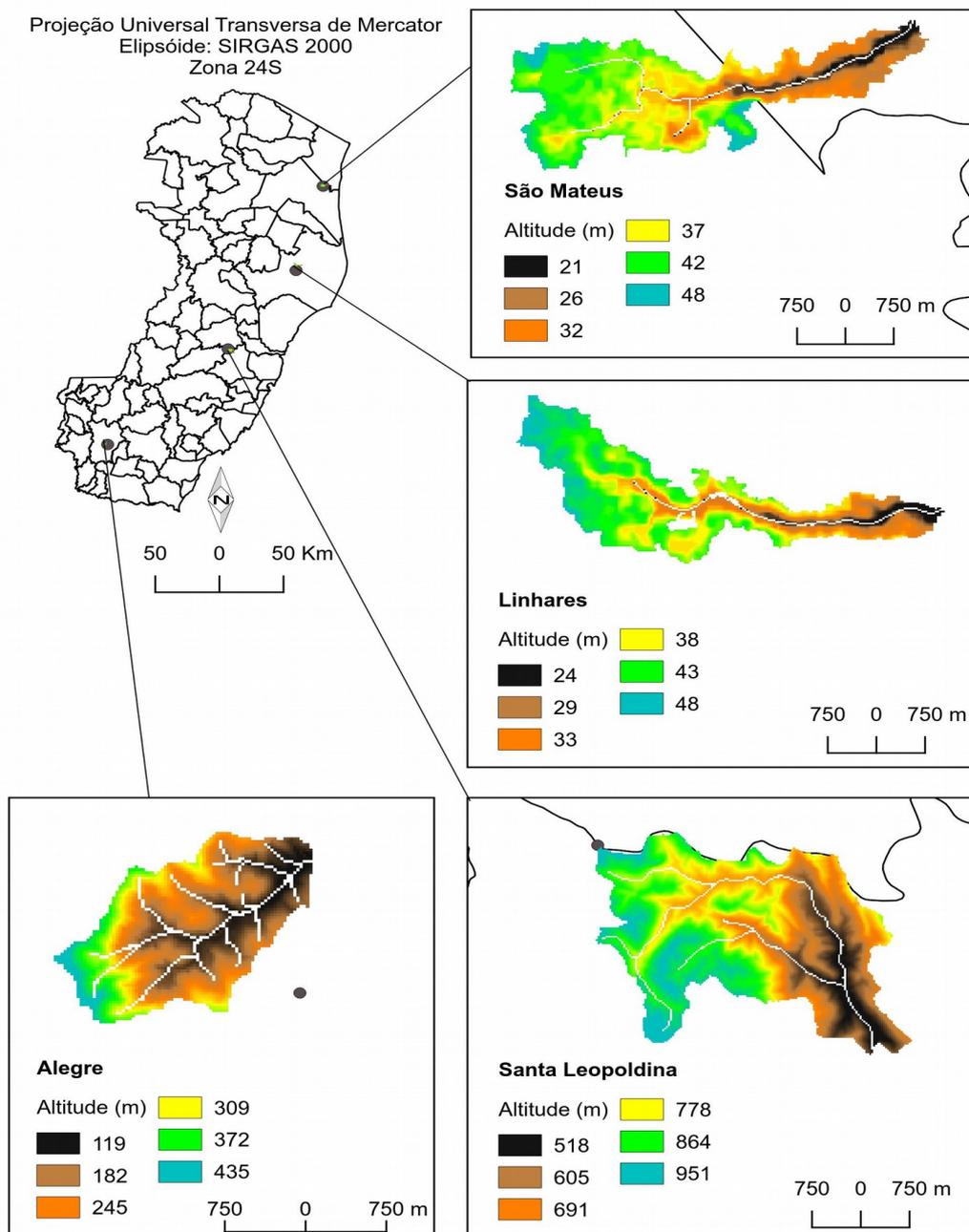
A escolha das microbacias hidrográficas foi baseada na proximidade com as estações meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) o que permitiu melhor representatividade das variáveis meteorológicas locais. As características gerais das microbacias são apresentadas na Tabela 3.

Os dados de altitude utilizados neste estudo nas microbacias de São Mateus e Linhares foram extraídos do Modelo Digital de Elevação (MDE) fornecido pelo Instituto Nacional de pesquisas espaciais INPE a partir de dados de satélite (disponível em [www.dsr.inpe.br/topodata/index.php](http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php)). Os dados originais apresentam resolução espacial de 30m que foi mantida para o desenvolvimento deste trabalho. Para as microbacias de Alegre e Santa Leopoldina foi utilizado o MDT (modelo digital do terreno) com resolução espacial de 2 m, a qual foi recalculada para resolução de 30 m, pelo método do vizinho mais próximo (dados obtidos do Sistema Integrado de Bases Geoespaciais do estado do Espírito Santo - GEOBASES).

Utilizando-se dos mapas de altitude e da hidrografia do ES, procedeu-se a demarcação das microbacias por meio de programa livre de sistema de informações geográficas GRASS GIS (GRASS Development Team, 2016), cujas coordenadas dos exutórios são apresentados na Tabela 3.

O mapa de solo e de uso do solo utilizados neste estudo foram disponibilizados pelo GEOBASES. A classificação do uso do solo é produto final do levantamento aerofotogramétrico realizado entre 2007 e 2008, apresenta 22 classes de uso da terra para o estado do Espírito Santo.

Figura 5 - Mapa de localização das quatro microbacias utilizadas como estudo de caso para aplicação da metodologia proposta. Identificação das bacias e das estações meteorológicas do INMET mais próximas.



Fonte: o autor.

Com base nas classes apresentadas pelo GEOBASES foi feita uma reclassificação das microbacias resultando em cinco classes: mata nativa (MN), pastagem (PA), café (CA), eucalipto (EU) e agricultura (AG), este último representando a classe de culturas temporárias.

Tabela 3: Descrição das microbacias hidrográficas utilizadas no estudo

Microbacia	Área (ha)	Alt (m)	Prec (mm)	Coordenada da estação		Sub-bacia	Coordenada do exutório	
				Lat	Long		Lat	Long
Alegre	265,23	129	1359,4	-20,75°	-41,49°	Rio Itapemirim	-20,73°	-41,49°
Santa Leopoldina	1103,76	976	1350,8	-19,99°	-40,58°	Baía de Vitória	-20,02°	-40,54°
São Mateus	774,36	29	1165,6	-18,68°	-39,86°	Rio São Mateus	-19,31°	-40,02°
Linhares	630,81	38	1198,2	-19,36°	-40,07°	Rio Doce	-18,66°	-39,82°

Fonte: o autor. Área: área da bacia em hectares; Alt: Altitude média da bacia; Prec: Precipitação média anual; Lat: latitude; Long: longitude; Sub-bacia: Sub-bacia na qual a microbacia está localizada de acordo com mapa do IEMA.

#### 4.2.2 Restrições de classes de uso do solo

O método consiste na alocação de diferentes usos do solo, a qual está sujeita à duas restrições espaciais: a primeira está relacionada à classe de aptidão do solo, ou seja, de acordo com a declividade do terreno são permitidos alguns usos do solo (maior a inclinação, mais restritivo é o terreno quanto ao uso). A segunda restrição se refere à proibição do desmatamento de áreas previamente ocupadas por mata nativa.

A criação de restrições de uso do solo utilizada neste trabalho foi adaptada da metodologia apresentada por (Rio Grande do Sul, 1983). Neste caso considerou-se a declividade como limitador na determinação do uso da terra para a criação das classes de uso extraídas a partir dos modelos digitais de elevação (MDE).

Pela classificação implementada, áreas planas apresentam pouca ou nenhuma restrição quanto ao uso da terra, enquanto que áreas mais íngremes devem ser destinadas ao uso com plantios florestais e proteção com vegetação natural. Neste trabalho consideram-se três classes de uso do solo de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 - Descrição das classes de aptidão de uso da terra de acordo com a declividade, explicitando os usos que são permitidos por classe.

Classe de uso	Declividade	Uso permitido
Classe 1	0 <= 20%	Mata nativa, pastagem, café, eucalipto, agricultura.
Classe 2	20% <= 40%	Mata nativa, pastagem, eucalipto.
Classe 3	> 40%	Mata nativa, eucalipto.

Fonte: o autor

A Figura 6 apresenta a distribuição espacial das classes de uso por microbacia. Observa-se que as MbAL e MbSL apresentaram maior parte de sua área na classe 3, seguida da classe 2, caracterizando uma bacia com muitas áreas inclinadas, conseqüentemente, com muita restrição ao seu uso. Apenas cerca de 9% de suas áreas não apresentam restrição quanto ao uso da terra, de acordo com o critério estabelecido por este trabalho, ou seja, podem ser cultivadas com qualquer uso da terra (Tabela 5).

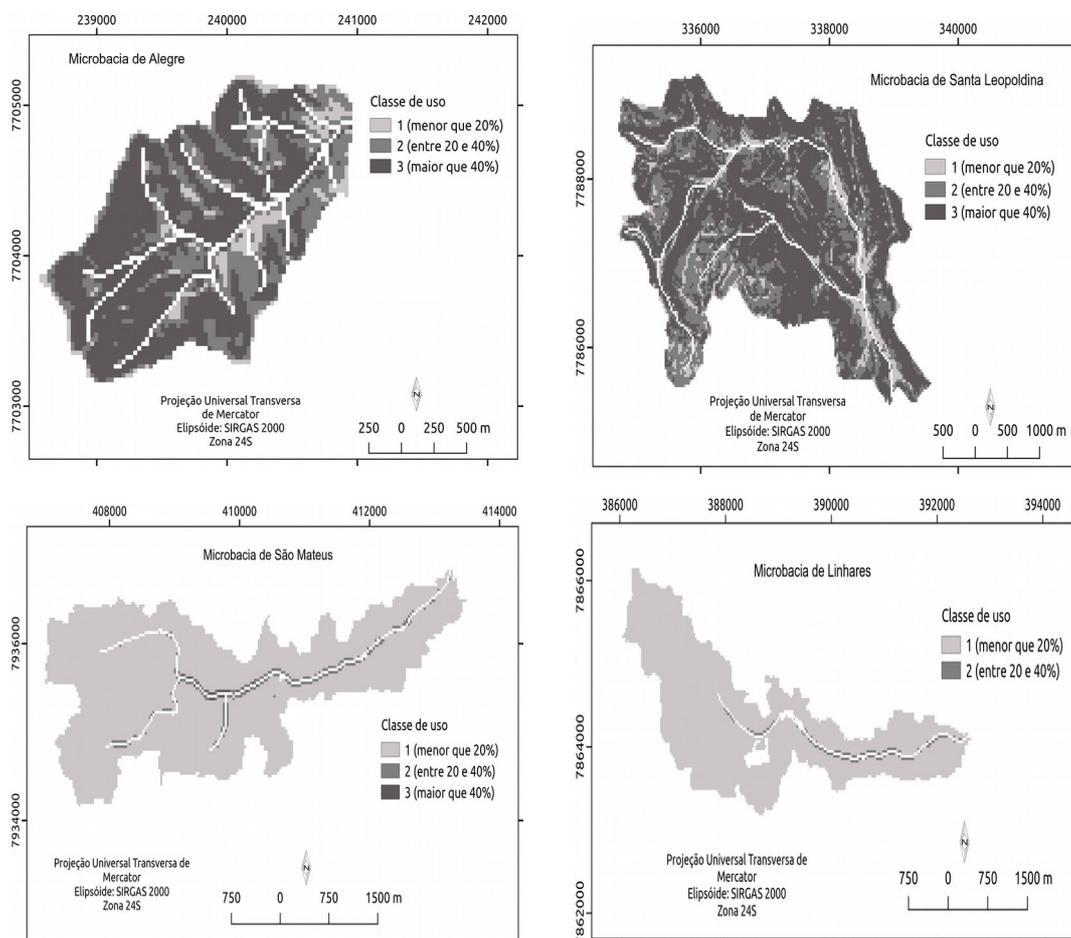
Tabela 5 - Porcentagem das áreas das microbacias por classe de uso.

	Alegre (%)	Santa Leopoldina (%)	São Mateus (%)	Linhares (%)
Classe 1	9.06	9.49	96.76	98.00
Classe 2	29.49	29.00	2.93	2.00
Classe 3	61.45	61.52	0.31	0.00

Fonte: o autor.

As MbSM e MbLI apresentaram praticamente toda a área na classe 1, menor que 20% de declividade, o que refletiu em quase total ausência de restrição de uso da terra (Tabela 5).

Figura 6 - Distribuição das classes de uso da terra por microbacia.



Fonte: o autor.

#### 4.2.3 Variáveis de interesses

##### 4.2.3.1 Perda de solo

Para o cálculo da PS foi considerada a Equação 9, a qual fornece a perda de solo perdida em  $t\ ha^{-1}ano^{-1}$ . Os valores dos fatores que compõe a equação são apresentados em sequência.

O fator R, que representa a erosividade, está apresentado por município na Tabela 6. Os valores foram retirados do software NetErosividade (Cecílio *et al.*, 2010) para os municípios de Alegre, Santa Teresa (representando a microbacia de Santa Leopoldina), São Mateus e Linhares. Tais valores foram espacializados para toda a microbacia.

Tabela 6 - Valores de erosividade por município (Cecílio *et al.*, 2010).

Cidade	Alt (m)	Lat	Long	EI30 (MJ.mm/h.ha.ano)
Alegre	308	20°45'36" S	41°31'48" W	6851
Santa Teresa	748	19°55'47" S	40°36'00" W	7583
São Mateus	9	18°42'36" S	39°51'00" W	5056
Linhares	19	19°23'24" S	40°04'12" W	6292

Os valores referentes ao fator K (erodibilidade do solo), são apresentados por tipo de solo presente em cada área de estudo na Tabela 7.

Table 7 - Valores de erodibilidade do solo utilizados neste trabalho.

Tipo de solo	Fator K (Mg h ha <sup>-1</sup> MJ <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup> )	Fonte
Argissolo vermelho	0,032	Denardin (1990) citado por Oliveira (2011)
Cambissolo Háptico	0,035	Silva et al. (2009)
Latossolo Vermelho – Amarelo (LVA Distrófico)	0,017	Bertoni e Lombardi Neto (2005)
Nitossolo Vermelho eutrófico	0,035	Bertoni e Lombardi Neto, (2005)

Os valores do fator topográfico referente ao comprimento e grau de declive (fator LS) foram obtidos por meio do programa GRASS (Neteler *et al.*, 2012) e fornecidos no formato matricial para cada microbacia com a mesma resolução espacial utilizada neste trabalho.

Os fatores C e P, que estão relacionados ao uso/manejo do solo e à práticas conservacionistas, respectivamente, foram obtidos do Manual operativo da ANA (Agência Nacional de Águas, 2012) e Silva et al. (2010) conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores do fator C e P para cada uso do solo. Valores obtidos do Manual operativo da ANA.

Uso do solo	Fator C	Fator P	Descrição da categoria
Mata Nativa	0,0004*	1,0	-
Pastagem	0,25	1,0	Pastagem degradada – manejo convencional
Café	0,135	0,5	Café em nível – manejo conservacionista
Eucalipto	0,047*	1,0	Reflorestamento – manejo conservacionista
Agricultura	0,25	1,0	Grãos – manejo conservacionista

\*Valores retirados de Silva et al. (2010) .

#### 4.2.3.2 Excedente hídrico

O cálculo do EXC foi feito pela metodologia descrita no item 4.1.3.2 cujos dados necessários são apresentados em sequência.

Os valores de Z, CAD unitária e CAD das culturas são apresentados nas Tabelas 9, 10 e 11, respectivamente. Os valores da CAD unitária são apresentados por Pereira, Angelocci e Sentelhas (2002), citando Doorenbos e Kassam (1994). Quanto à textura do solo, foi considerada a classificação proposta por Bertoni e Lombardi Neto (2005).

Table 9 - Profundidade da raiz por uso do solo utilizada para o cálculo da CAD.

Uso do solo	Profundidade da raiz, Z (m)	Descrição da categoria	Fonte
Mata Nativa	1,5	Valor máximo de Zr, seringueira.	(Allen <i>et al.</i> , 1998)
Pastagem	1,0	Média do valor de Zr, pastagem extensiva.	(Allen <i>et al.</i> , 1998)
Café	1,2	Média do valor de Zr, café com ervas daninhas.	(Allen <i>et al.</i> , 1998)
Eucalipto	3,0	-	(Oliveira, 2014)
Agricultura	0,75	Média do valor de Zr, feijão seco.	(Allen <i>et al.</i> , 1998)

Tabela 10 - Valores de CAD unitária por tipo de solo.

Solo	Textura	Valor da CAD unitária (mm/m)
Latossolo	Pesada	200
Cambissolo	Pesada	200
Argissolo	Média	140
Nitossolo	Pesada	200

Fonte: adaptada de Pereira, Angelocci e Sentelhas (2002).

Tabela 11 - Valores de CAD (mm) por uso do solo e tipo de solo.

Uso do solo	Latossolo	Cambissolo	Argissolo	Nitossolo
Mata Nativa	300	300	210	300
Pastagem	200	200	140	200
Café	240	240	168	240
Eucalipto	600	600	420	600
Agricultura	150	150	105	150

Fonte: Adaptada pelo autor.

Os solos encontrados nas microbacias deste estudo foram classificados por grupos hidrológicos de acordo com a descrição de Sartori (2004). Neste caso, considerou-se: Latossolo, grupo hidrológico do tipo A; Cambissolo, tipo C; Argissolo, tipo B; Nitossolo, tipo B.

Os valores de CN utilizados neste trabalho são apresentados na Tabela 12. Considerando que as pastagens na região apresentam baixo uso de técnicas conservacionistas, haja vista a baixa capacidade de suporte das mesmas, foi feita a opção de classificar as áreas de pastagens em um nível hidrológico abaixo do classificado por Sartori (2004). Exemplificando, na pastagem em latossolo (que é um solo do tipo A) utilizou-se o valor de CN referente ao solo do tipo B, ou seja, uma categoria inferior. Essa abordagem foi aplicada nas pastagens que se encontravam em todos os tipos de solo.

Tabela 12 - Valores de CN por uso do solo e tipo de solo. Valores em negrito da pastagem se referem ao CN de uma classe hidrológica inferior, os quais foram considerados neste trabalho.

Uso do solo	Latossolo	Cambissolo	Argissolo	Nitossolo
Mata Nativa	25	70	55	55
Pastagem	<b>68/79</b>	<b>86/89</b>	<b>79/86</b>	<b>79/86</b>
Café	61	81	73	73
Eucalipto	36	73	60	60
Agricultura	66	85	77	77

Fonte: adaptado de Pruski, Brandão e Silva, 2014, p.42.

As características referentes às condições hidrológicas de cada uso do solo para fins de classificação dos mesmos, são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Condição hidrológica, tratamento considerado para a condição de umidade antecedente AMC II.

Uso do solo	Categoria considerada	Condição hidrológica	Fonte
Mata Nativa	Floresta	Boa	Mokus,(1972) citado por Pruski, Brandão e Silva, (2014)
Pastagem	Pastagem para pastoreio.	Má, sem curva de nível	Mokus,(1972) citado por Pruski, Brandão e Silva, (2014)
Café	Café, cultivado em fileiras estreitas.	Boa com curva de nível	Mokus,(1972) citado por Pruski, Brandão e Silva, (2014)
Eucalipto	-	-	(Moreira, 2017)
Agricultura	Leguminosas em fileiras estreita, fileiras retas.	Má	Mokus,(1972) citado por Pruski, Brandão e Silva, (2014)

## Evapotranspiração

No cálculo da evapotranspiração da cultura foram considerados os valores de coeficiente da cultura ( $k_c$ ) apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Valores de kc por uso do solo.

Uso do solo	Descrição da categoria	kc	Fonte
Mata Nativa	Kc mid, seringueira.	1,00	(Allen <i>et al.</i> , 1998)
Pastagem	Kc mid, pastagem extensiva	0,75	(Allen <i>et al.</i> , 1998)
Café	Kc mid, café com ervas daninhas.	1,10	(Allen <i>et al.</i> , 1998)
Eucalipto	-	1,00	(Alves, 2009)
Agricultura	Kc mid, feijão seco	1,50	(Allen <i>et al.</i> , 1998)

#### 4.2.3.3 Renda bruta

A abordagem econômica utilizada neste trabalho foi baseada em dados de produção bruta das culturas (exceto para mata nativa) disponibilizados por Galeano et al. (2017) para os municípios de Alegre, Santa Leopoldina, São Mateus e Linhares. Em tal documento são apresentados os valores brutos da produção agropecuária do Espírito Santo para o biênio 2014/2015 que foram convertidos em R\$ ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>.

Os valores brutos de produção não foram descontados dos custos de produção, além de se tratar de uma média por município onde a microbacia está localizada. Os valores da renda bruta por uso do solo estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Valores de renda bruta (R\$ ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>) para os diferentes usos do solo e por municípios. Valores referentes a 2014 para classe Mata Nativa, e 2014/2015 para demais usos.

Uso do solo	Alegre	Santa Leopoldina	São Mateus	Linhares
Mata Nativa	226,89	226,89	226,89	226,89
Pastagem	718,54	718,54	718,54	718,54
Café	4222,86	9246,57	7939,12	7516,88
Eucalipto	3523,84	3529,97	3015,49	3528,37
Agricultura	1589,19	1931,82	1666,67	1362,86

Fonte: adaptado de Galeano et al. (2017).

Para análise da produção bruta por uso do solo são apresentadas algumas considerações quanto a categoria utilizada neste estudo, para obtenção dos respectivos valores de renda bruta:

- a classe agricultura foi representada pela categoria “feijão comum preto em grão”;

- para a classe eucalipto, considerou-se a “madeira em tora de eucalipto para celulose”. A produção média de eucalipto considerada foi de  $39 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (Industria brasileira de árvores, 2015).
- para a classe de pastagem, considerou-se rebanho bovino (cabeças) com lotação de  $0,4 \text{ ua ha}^{-1}$  (Dias-Filho, 2014) e o preço médio anual de novilhos de 2-3 anos (Galeano *et al.*, 2017) ;
- a atividade de cafeicultura foi representada pela categoria “café canephora, conilon robusta (em grão)”.

No valor remunerado pela manutenção da vegetação nativa foi considerado o valor referente a categoria "floresta em pé" determinado pelo programa reflorestar do governo do estado do Espírito Santo, estabelecido pelo decreto nº 4189-R (ESPÍRITO SANTO, 2017). O decreto estabelece que o proprietário receba 450 VRTE por hectare em um contrato de 5 anos, sendo feito o pagamento de 20% por ano. O valor utilizado do VRTE foi de R\$ 2,5210 referente à janeiro de 2014 (SEFAZ-ES).

#### 4.2.4 AHP - Saaty

Foi aplicada a metodologia AHP nas 4 microbacias seguindo os passos descritos no item 4.1.4. Em cada área de estudo foi simulada uma ação de tomada de decisão considerando os interesses de tomador de decisão hipotético, o qual indicava suas preferências de acordo com as peculiaridades de cada região. Desta forma obtiveram-se os pesos a serem aplicados em cada microbacia durante o processo de otimização e os respectivos índices de conformidade, conforme apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 - Valores dos pesos e índices obtidos pelo método AHP aplicado nas microbacias de Alegre, Santa Leopoldina, São Mateus e Linhares. PS: peso atribuído à variável perda de solo. EXC: peso atribuído à variável excedente hídrico. RE: peso atribuído à variável renda bruta. n: número total de variáveis.  $IR_{tab}$ : é o índice de inconsistência aleatória.  $\Lambda_{max}$ : é o autovalor máximo da matriz de comparação. IC: índice de Consistência. RC: razão de Consistência.

Microbacias	PS	EXC	RE	n	$IR_{tab}$	$\Lambda_{max}$	IC	RC
Alegre	0,75	0,07	0,18	3	0,58	3,029	0,01	0,025
Santa Leopoldina	0,64	0,07	0,28	3	0,58	3,065	0,03	0,06
São Mateus	0,07	0,78	0,15	3	0,58	3,065	0,03	0,06
Linhares	0,07	0,64	0,28	3	0,58	3,065	0,03	0,06

Fonte: o autor.

#### 4.2.5 Cenários de aplicação

Nos quatro estudos de caso foram aplicados diferentes cenários de avaliação. Ao final do processo de otimização os resultados foram avaliados quanto à PS ( $t\ ha^{-1}ano^{-1}$ ), ao EXC ( $mm\ ano^{-1}$ ), à RE ( $R\$\ ha^{-1}ano^{-1}$ ), das frações de uso da terra que a bacia otimizada apresentava. Os resultados foram sempre comparados com a situação de uso do solo atual de cada microbacia, considerada como referência da eficiência do método proposto.

##### 4.2.5.1 Análise de sensibilidade

Foi feita uma análise de sensibilidade a fim de compreender o comportamento individualizado de cada variável em relação as demais. Esta análise foi realizada antes da aplicação dos pesos definidos pela metodologia AHP. Cada variável teve o seu valor multiplicado por um escalar (1,2,3,5 e 10) enquanto que as demais se mantinham com peso igual a 1. Assim foi possível entender a resposta de cada variável à medida que era aumentado o seu peso. Ademais, observou-se a configuração, em porcentagem, dos usos da microbacia após variação dos pesos.

##### 4.2.5.2 Aplicação dos pesos AHP

O uso da metodologia AHP permitiu o estabelecimento de pesos para cada microbacia de acordo com a demanda do tomador de decisão. Esses pesos foram aplicados nas respectivas microbacias e os efeitos sobre as variáveis do estudo e sobre a configuração da paisagem foram avaliados.

Os pesos determinados pela método AHP expressam diferentes estratégias de planejamento, ou seja, estabelecer maior peso na variável EXC por exemplo, significaria ter ações de conservação de água na microbacia. Assim foi criado um cenário onde os pesos das MbSL, MbSM e MbLI foram aplicados no processo de otimização da MbAL e comparados com a aplicação de seus próprios pesos (valores apresentados na Tabela 16). Desta forma, foi possível constatar o efeito de diferentes estratégias no planejamento, aplicados em uma única microbacia, no caso a MbAL.

#### 4.2.5.3 Restrição de classe de uso e desmatamento

Foi criado um cenário para investigar o efeito da implantação de restrições de uso do solo e da proibição do desmatamento.

No primeiro caso foi aplicado o método considerando as restrições de uso do solo apresentadas na Tabela 5. Em seguida foi feita uma simulação sem considerar tais restrições, ou seja, cada pixel poderia ser ocupado por qualquer uso do solo independente da inclinação do terreno. Esta simulação representa um comportamento geral observado nas áreas rurais onde não são respeitadas as classes de uso do solo.

No segundo caso, foi simulada a proibição ou não do corte de áreas previamente ocupadas com mata nativa. Desta forma foi representada as limitações legais que poderiam ocorrer nas bacias quanto ao desmatamento.

Estes dois cenários são apresentados em conjunto, ressaltando a interação das duas ações nas quatro microbacias consideradas neste estudo.

#### 4.2.5.4 Variação na renda da mata nativa

Conforme apresentado na Tabela 15, as áreas de mata nativa apresentam a menor renda bruta (R\$ 226,89 ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>). Assim, com o objetivo de entender qual a influência de um possível aumento da renda gerada a partir de áreas verdes, foram criados cenários onde a renda bruta era multiplicado por um escalar 1, 2, 3, 4, 10, 20 e 30 (o fator 30 foi aplicado apenas na microbacia de São Mateus).

Na simulação foram aplicados os respectivos pesos de cada microbacia, mantida a área inicial de vegetação nativa sem alteração e aumentada gradativamente a renda bruta oriunda da mata. Ao final foram avaliados possíveis efeitos nas variáveis PS, EXC e RE, assim como nas porcentagens de áreas ocupadas pelas mesmas.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Balanço hídrico

O resultado do balanço hídrico para o período de 35 anos é apresentado por microbacia nas Tabelas 17 e 18.

As MbAL e MbSL apresentaram as maiores precipitações, enquanto que a menor evapotranspiração potencial foi encontrada na MbAL. A maior relação  $E_t0/Prec$  foi encontrada na MbSM (117,5%) e a menor na MbAL (94,8%). A relação da evapotranspiração real da cultura com a precipitação foi em média de 75,3% para todas as microbacias. Os maiores valores da relação  $E_{tr}/Prec$  (evapotranspiração real da cultura/precipitação anual) foram encontrados nas MbSM e MbLI. O valor da  $E_{tr}$  chegou a 87% em áreas com eucalipto enquanto que em áreas sob pastagem o valor foi de cerca de 61% nas MbAL e MbSL.

Os maiores valores de EXC foram encontrados em áreas com pastagem independente da microbacia que se encontrava, seguido pela área de mata nativa. Os menores valores foram encontrados em áreas ocupadas por eucalipto, sendo que as áreas na MbSM apresentaram o menor valor obtido neste estudo ( $117 \text{ mm ano}^{-1}$ ). O maior valor de excedente encontrado neste trabalho foi na MbSL em Latossolo e sob uso de pastagem,  $448 \text{ mm ano}^{-1}$ .

Analisando o escoamento superficial, calculado pelo método NC, observa-se que os menores valores são encontrados em áreas com a presença de mata nativa, com valor máximo de 2% da precipitação. Os maiores valores foram encontrados em pastagens situadas em Cambissolo na microbacia de Santa Leopoldina (aproximadamente 17%). As MbAL, MbSM e MbLI apresentaram valores semelhantes de escoamento superficial variando apenas os valores por tipo de uso do solo.

Tabela 17 - Valores do balanço hídrico (mm ano<sup>-1</sup>) para a microbacia de Alegre e Santa Leopoldina.

Alegre												
Prec	Eto	Eto/Prec (%)	solo	uso	pEfet	Etc	Exc	Etr	Exc/Prec (%)	pEfet/Prec (%)	Etc/Prec (%)	Etr/Prec (%)
1359	1289	94.8	Nitossolo	Mata Nativa	1337	1289	320	1017	23.5	98.3	94.8	74.8
				Pastagem	1232	967	416	816	30.6	90.7	71.1	60.0
				Café	1275	1418	236	1039	17.4	93.8	104.3	76.4
				Eucalipto	1325	1289	233	1092	17.2	97.5	94.8	80.3
				Agricultura	1249	1482	246	1003	18.1	91.9	109.0	73.8
Santa Leopoldina												
Prec	Eto	Eto/Prec (%)	solo	uso	pEfet	Etc	Exc	Etr	Exc/Prec (%)	pEfet/Prec (%)	Etc/Prec (%)	Etr/Prec (%)
1351	1339	99.1	Latossolo	Mata Nativa	1349	1339	327	1022	24.2	99.9	99.1	75.7
				Pastagem	1276	1004	448	828	33.1	94.4	74.3	61.3
				Café	1302	1473	260	1042	19.3	96.4	109.0	77.1
				Eucalipto	1345	1339	242	1103	17.9	99.6	99.1	81.6
				Agricultura	1283	1539	281	1003	20.8	95.0	114.0	74.2
			Cambissolo	Mata Nativa	1267	1339	248	1019	18.3	93.8	99.1	75.4
				Pastagem	1124	1004	301	823	22.3	83.2	74.3	60.9
				Café	1189	1473	157	1031	11.7	88.0	109.0	76.3
				Eucalipto	1251	1339	157	1095	11.6	92.6	99.1	81.0
				Agricultura	1138	1539	149	989	11.0	84.2	114.0	73.2

Fonte: o autor.

Onde: Prec – precipitação anual, Eto – evapotranspiração potencial, pEfet – precipitação efetiva (precipitação total descontado o escoamento superficial), Etc- evapotranspiração da cultura, Exc – excedente hídrico, Etr – evapotranspiração real da cultura.

Tabela 18 - Valores d balanço hídrico (mm ano<sup>-1</sup>) para a microbacia de São Mateus e Linhares.

São Mateus												
Prec	Eto	Eto/Prec (%)	solo	uso	pEfet	Etc	Exc	Etr	Exc/Prec (%)	pEfet/Prec (%)	Etc/Prec (%)	Etr/Prec (%)
1166	1369	117.5	Argissolo	Mata Nativa	1143	1369	196	948	16.8	98.1	117.5	81.3
				Pastagem	1065	1027	285	779	24.5	91.3	88.1	66.8
				Café	1095	1506	145	951	12.4	94.0	129.2	81.6
				Eucalipto	1134	1369	117	1017	10.1	97.3	117.5	87.2
				Agricultura	1076	1575	168	909	14.4	92.3	135.1	77.9
Linhares												
Prec	Eto	Eto/Prec (%)	solo	uso	pEfet	Etc	Exc	Etr	Exc/Prec (%)	pEfet/Prec (%)	Etc/Prec (%)	Etr/Prec (%)
1198	1358	113	Argissolo	Mata Nativa	1175	1358	233	943	19.4	98.1	113.4	78.7
				Pastagem	1092	1019	309	783	25.8	91.1	85.0	65.3
				Café	1125	1494	175	950	14.6	93.9	124.7	79.3
				Eucalipto	1166	1358	143	1022	12.0	97.3	113.4	85.3
				Agricultura	1105	1562	192	912	16.0	92.2	130.4	76.2

Fonte: o autor.

Onde: Prec – precipitação anual, Eto – evapotranspiração potencial, pEfet – precipitação efetiva (precipitação total descontado o escoamento superficial), Etc- evapotranspiração da cultura, Exc – excedente hídrico, Etr – evapotranspiração real da cultura.

## 5.2 Simulação para as microbacias

### 5.2.1 Microbacia de Alegre

A MbAL possui área de 265,23 ha sendo 79,9% de sua área ocupada por pastagem e o restante (20,1%) ocupada por mata nativa. A microbacia apresenta perda de solo na ordem de  $114 \text{ t ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ , excedente hídrico de  $397 \text{ mm ano}^{-1}$  e uma renda bruta de R\$  $619,94 \text{ ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ . Além disso, apresenta 9,1% de sua área como Classe 1, 29,5% como Classe 2 e 61,4% como Classe 3.

#### 5.2.1.1 Análise de sensibilidade

Na figura 7 são apresentados os gráficos com valores de perda do solo ( $\text{t ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ ), excedente ( $\text{mm ano}^{-1}$ ) e renda bruta ( $\text{R\$ ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ ) para a MbAL, após aplicação da otimização. Nesta análise ocorre variação no eixo x dos pesos que foram atribuídos à cada variável a fim de identificar o comportamento individualizado das mesmas.

No primeiro conjunto de gráficos (primeira linha de gráficos) ocorre a mudança dos pesos apenas na variável PS. Na segunda linha é apresentado a variação apenas na variável EXC e por último a mudança na variável RE. Os pesos variam em 2, 3, 5 e 10, para a variável em questão, sendo representado pelas letras B, C, D e E, respectivamente. A letra "A" indica peso 1 para todas as três variáveis.

A aplicação da otimização na MbAL respeitando as restrições de classes de uso do solo reduziu de maneira expressiva a perda de solo na mesma, independente dos pesos que foram atribuídos em todas simulações. Em contrapartida, diminuiu o excedente hídrico em relação ao uso do solo atual da bacia em todas as simulações.

Ao analisar apenas o comportamento da variável perda de solo, tem-se que maiores valores dos pesos nesta variável diminui a perda de solo, reduzindo-a em quase sua totalidade. A variação no peso da variável perda de solo praticamente não afeta os valores do excedente hídrico (ficando próximos à  $310 \text{ mm ano}^{-1}$ ), enquanto que diminui claramente os valores da renda da microbacia. Os valores de renda bruta diminuem a medida que as áreas ocupadas por mata nativa aumentam em detrimento de áreas com pastagens.

Quanto à variação do peso da variável EXC, é possível observar aumento na perda de solo e no excedente hídrico produzido na microbacia. Ao mesmo tempo, tem-se uma diminuição progressiva da renda bruta gerada à partir do cenário B.

A microbacia produz renda inferior ao uso atual (R\$ 619.94 ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>) à partir do cenário C. Quando se prioriza o EXC há um comprometimento da renda bruta da microbacia variando de cerca de R\$ 1300 ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup> à R\$ 500 ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup> à medida que se aumenta o peso na variável EXC. Maiores valores dos pesos em EXC (colunas C, D e E) são resultados do aumento de áreas com pastagens em detrimento de áreas de mata nativa e, principalmente de eucalipto.

Avaliando-se a mudanças do peso aplicada na variável RE (última linha de gráficos), entende-se que o incremento da renda bruta ocorre às custas da degradação ambiental, ou seja, pelo aumento da perda de solo e diminuição do excedente hídrico. Embora a perda de solo tenha diminuído com a otimização, quando comparada ao uso atual, à medida que se aumenta o peso na variável RE, ocorre concomitantemente um aumento na variável perda de solo. Dessa forma os valores de perda de solo deixam de ser insignificantes e passam a representar um comprometimento ambiental.

Na microbacia de Alegre, ao se priorizar a geração de renda ocorre maior ocupação de áreas de eucalipto, chegando à valores próximos à 84%, reduzindo drasticamente os demais usos da terra. Isso ressalta a importância da análise de sensibilidade, uma vez que mostra a inviabilidade ambiental quando são atribuídos pesos muito altos à renda.

#### 5.2.1.2 Aplicação dos pesos AHP

Com o objetivo de avaliar o efeito da aplicação de diferentes interesses no planejamento ambiental (como por exemplo, foco na perda de solo ou no excedente hídrico) foram aplicados os pesos determinados pela metodologia AHP para as MbSL, MbSM e MbLI (Tabela 16) na MbAL. Esses perfis foram comparados com os cenários de aplicação do próprio peso da MbAL e quando se aplicou o cenário A, peso 1 para todas as variáveis (Figura 8). Além disso, pode ser observado o efeito de se respeitar a classe de uso da terra (gráficos com título “com classe”) ou a ignorá-la (“sem classe”).

Quando o peso é maior na variável perda de solo, há grande redução desta variável (representado pelas colunas AL e Psl), fator positivo ambientalmente. Porém, há concomitantemente diminuição do excedente hídrico, especialmente com o Psl, com

valores abaixo de  $300 \text{ mm ano}^{-1}$ , onde há um aumento do peso referente a renda bruta, em detrimento da PS (Tabela 16). Assim, quando se desloca o peso da variável PS para a variável RE, diminui-se o excedente pelo aumento de áreas ocupadas por eucalipto (34,4%).

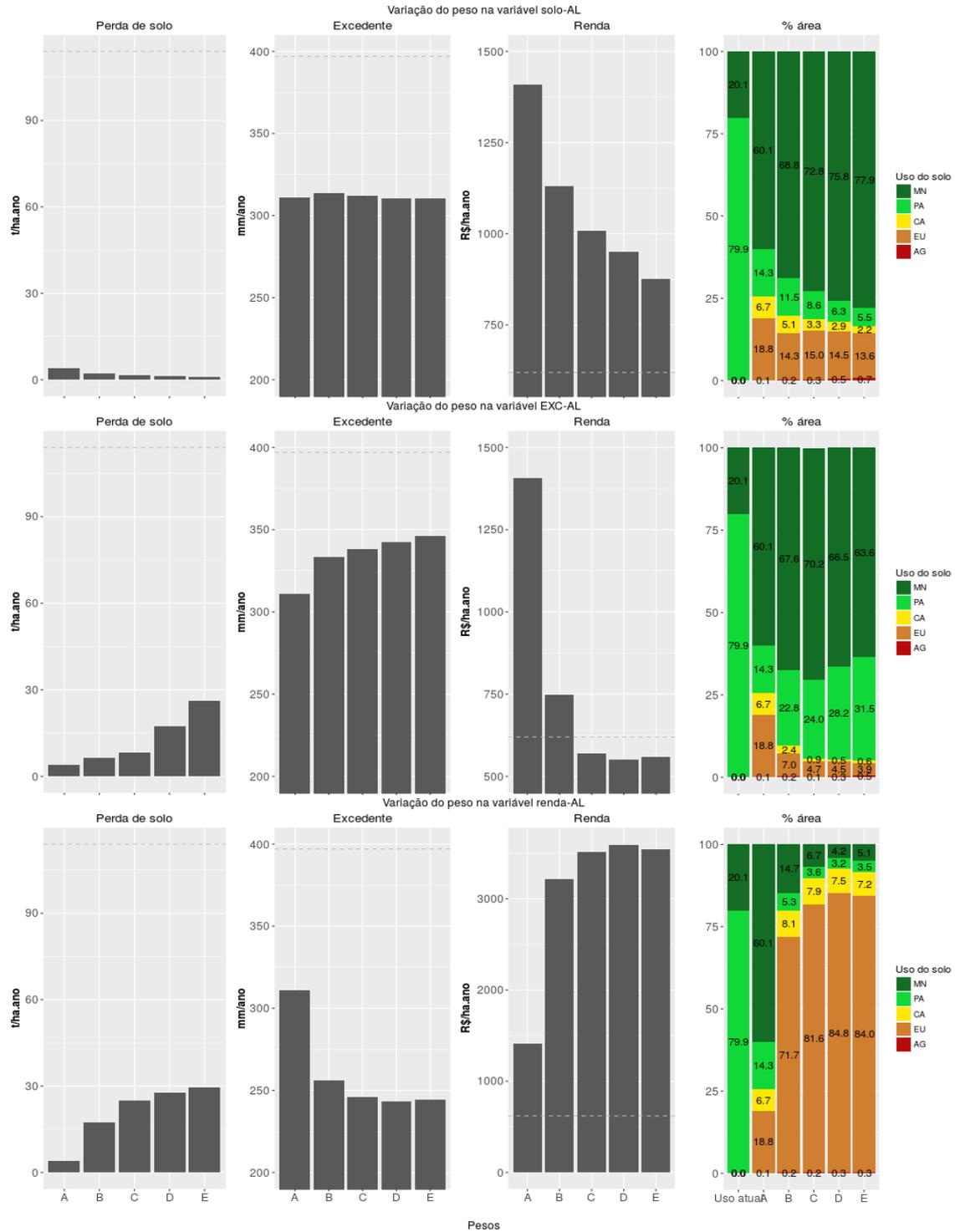
O cenário com foco na produção de excedente hídrico (representado pelas colunas Psm e Pli), mostra claramente que é possível aumentar o excedente embora o mesmo se mantenha abaixo do fornecido pelo uso atual do solo da MbAL. Há um custo ambiental quando se aumenta o excedente, representado pelo aumento da perda de solo (valores próximos à  $28 \text{ t ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ ) e um custo social devido à redução da renda bruta da microbacia. Neste último, os valores chegam a ser inferiores ao uso atual da microbacia. A produção de água exige aumentar a área de mata nativa (cerca de 60%) e aumentar a área de pastagem à 33% e manter uma pequena parte da área com eucalipto (5%).

Na MbAL o respeito às classe de uso da terra tem efeitos distintos dentre as abordagens apresentadas (peso maior na PS ou no EXC). Com o peso maior na variável PS, ao se retirar a restrição de classe há uma redução do EXC produzido na microbacia. Quando o peso maior é destinado a produção de EXC, a retirada da restrição gera um aumento do mesmo. O que implica em dizer que casos onde o planejamento foca na PS seria mais interessante ambientalmente manter as classes de restrições, uma vez que elas diminuem mais a PS e aumentam o EXC.

Ao se avaliar apenas a produção de excedente hídrico (gráfico “Excedente”), a retirada da restrição da classe de uso causou a diminuição do excedente quando o foco era na perda de solo (colunas AL e Psl) e causa um aumento do excedente quando o peso maior foi dado ao excedente (colunas Psm e Pli). A retirada da restrição de classe de uso causa um grande aumento na renda bruta quando o foco é na perda de solo atingindo valores próximos à  $\text{R\$ } 4000 \text{ ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ . Há um aumento, em menor magnitude, quando o foco é na produção de água.

Em um cenário com foco na diminuição da perda de solo e sem as restrições da classe de uso da terra há um equilíbrio entre a ocupação de três usos da terra (café, mata nativa e eucalipto), apresentados nas colunas AL e Psl do gráfico de porcentagem de áreas. Quando o peso maior é atribuído ao excedente hídrico (Psm e Pli) há um domínio maior dos usos pela pastagem ocupando aproximadamente 69% da área da microbacia.

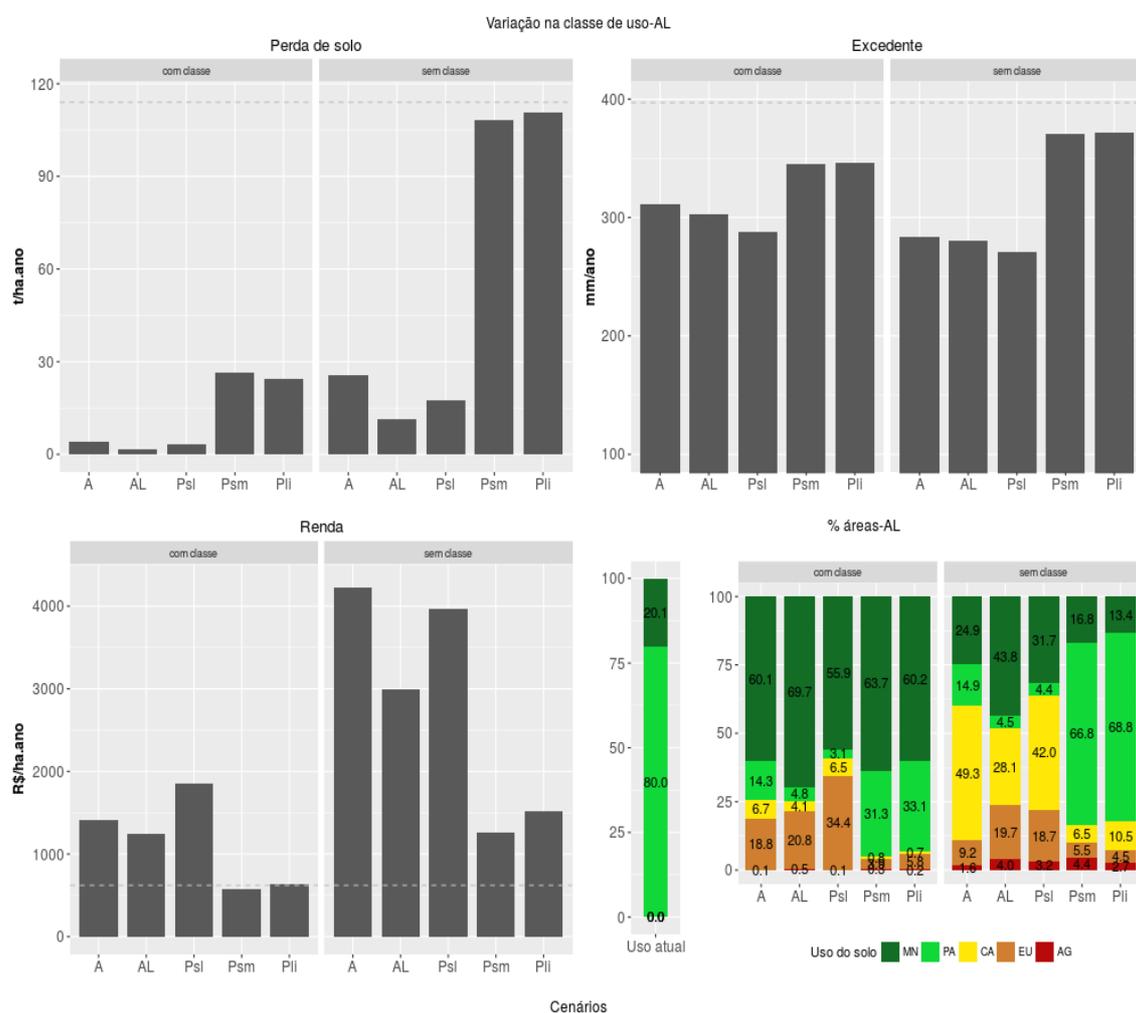
Figura 7 - Análise de sensibilidade aplicando pesos distintos por variável. A linha pontilhada representa o valor da variável no uso atual do solo. A = peso 1 para todas as três variáveis na função objetivo. B= peso 2 na variável a ser avaliada e 1 nas demais. C = peso 3 na variável a ser avaliada e 1 nas demais. D = peso 5 na variável a ser avaliada e 1 nas demais. E = peso 10 na variável a ser avaliada e 1 nas demais. AL = microbacia de Alegre. % área = porcentagem da área da microbacia ocupada por determinado uso do solo.



Fonte: o autor.

Nos cenários avaliados, a MbAL apenas apresentou áreas ocupadas com cultivos agrícolas (uso do solo AG) quando não houve restrição quanto às classes de uso do solo, ainda que essas áreas tenham sido abaixo de 5% da microbacia.

Figura 8 - Aplicação de diferentes pesos na microbacia de Alegre. A linha pontilhada representa o valor da variável no uso atual do solo. A = peso 1 aplicado nas três variáveis. AL = peso definido pelo método AHP para a microbacia de Alegre. Psl = peso definido pelo método AHP para a microbacia de Santa Leopoldina. Psm = peso definido pelo método AHP para a microbacia de São Mateus. Pli = peso definido pelo método AHP para a microbacia de Linhares. % área = porcentagem da área da microbacia ocupada por determinado uso do solo. Com classe = respeitando a restrição de classes de uso. Sem classe = sem restrição de classe de uso.



Fonte: o autor.

### 5.2.1.3 Restrição de classes de uso e mata nativa fixa

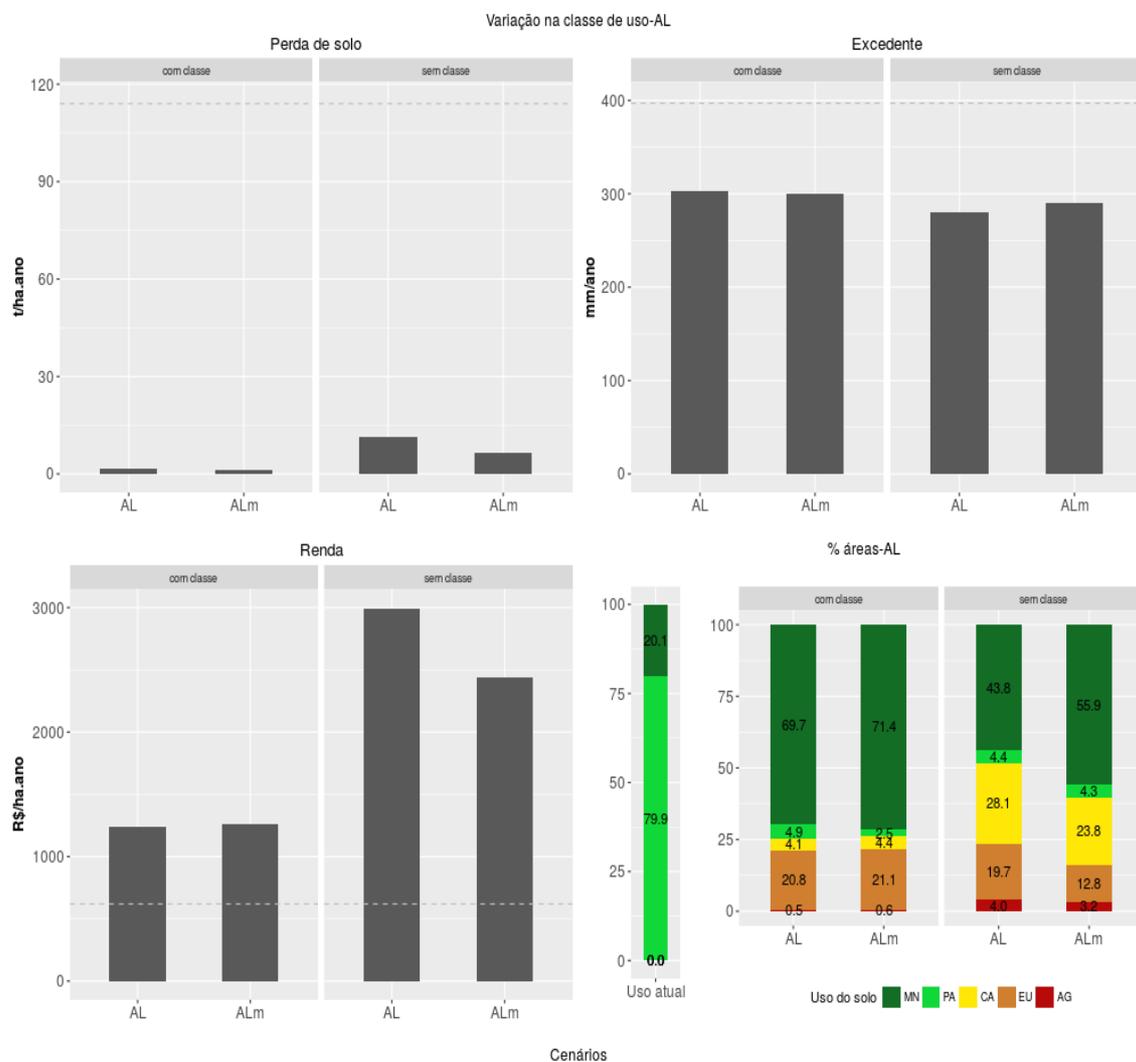
Ao aplicar os pesos calculados pelo método AHP para a MbAL foi avaliado o efeito conjunto da proibição do corte da mata nativa (mantendo fixa a área ocupada originalmente por mata nativa, que neste caso ocupava 20,1% da área da microbacia) e o efeito da aplicação das restrições de uso do solo conforme apresentado na Figura 9.

O fato de fixar as áreas com a mata nativa do uso atual não apresentou efeito direto nas variáveis. As porcentagens de áreas ocupadas pelos usos praticamente não diferiram. Apenas houve diminuição da área de pastagem quando se manteve a área de mata nativa fixa.

Ao se avaliar o efeito da retirada da mata nativa presente atualmente na microbacia, quando não se respeita as classes de aptidão, é possível observar que a presença da mata nessas áreas diminui a perda de solo, aumenta o excedente hídrico, porém diminui a renda (colunas AL e ALm dos gráficos “sem classe”). Tal efeito é observado devido à diminuição de áreas com café e aumento das áreas com mata nativa (23,8% e 55,9% respectivamente).

As áreas ocupadas pela mata nativa aumentam em áreas com maior inclinação, mostrando a coerência do método de otimização quando não são consideradas as classes de uso da terra e é colocado maior peso na variável perda de solo. As áreas de mata nativa são direcionadas a ocupar áreas mais íngremes, representando aproximadamente 20%, 35% e 52% das classes 1, 2 e 3, respectivamente, quando utilizados os pesos AL (Tabela 19).

Figura 9 - Avaliação da aplicação das restrições de classes de uso e da manutenção da área de mata nativa fixa. A linha pontilhada representa o valor da variável no uso atual do solo. AL = peso definido pelo método AHP para a microbacia de Alegre. ALm = peso definido pelo método AHP para a microbacia de Alegre, porém mantendo a área de mata nativa fixa (simulando a proibição de corte). Com classe = respeitando a restrição de classes de uso. Sem classe = sem restrição de classe de uso.



Fonte: o autor.

Tabela 19 - Porcentagem da área da microbacia de Alegre por classe de uso do solo ocupada por cada uso do solo sob diferentes pesos na função objetivo. AL = peso definido pelo método AHP para a microbacia de Alegre. Psl = peso definido pelo método AHP para a microbacia de Santa Leopoldina. Psm = peso definido pelo método AHP para a microbacia de São Mateus. Pli = peso definido pelo método AHP para a microbacia de Linhares.

Classe de Uso	Uso da terra	Uso atual (%)	Sem restrição de classe			
			AL (%)	Psl (%)	Psm (%)	Pli (%)
1 (9,06%)	MN	11,99	20,22	25,84	22,1	13,86
	PA	88,01	13,86	12,36	52,06	61,05
	CA	0,00	21,72	31,46	9,74	10,11
	EU	0,00	36,33	23,97	7,12	9,74
	AG	0,00	7,87	6,37	8,99	5,24
2 (29,49%)	MN	12,66	34,87	22,09	15,65	14,73
	PA	87,34	6,21	7,83	63,29	59,95
	CA	0,00	34,98	45,68	7,59	14,96
	EU	0,00	16,92	18,41	6,9	6,9
	AG	0,00	7,02	5,98	6,56	3,45
3 (61,45%)	MN	24,79	51,57	37,16	16,62	12,76
	PA	75,21	2,21	1,6	70,62	74,27
	CA	0,00	25,73	41,8	5,47	8,45
	EU	0,00	18,55	18,00	4,58	2,54
	AG	0,00	1,93	1,44	2,71	1,99
Área total	265,23 ha					

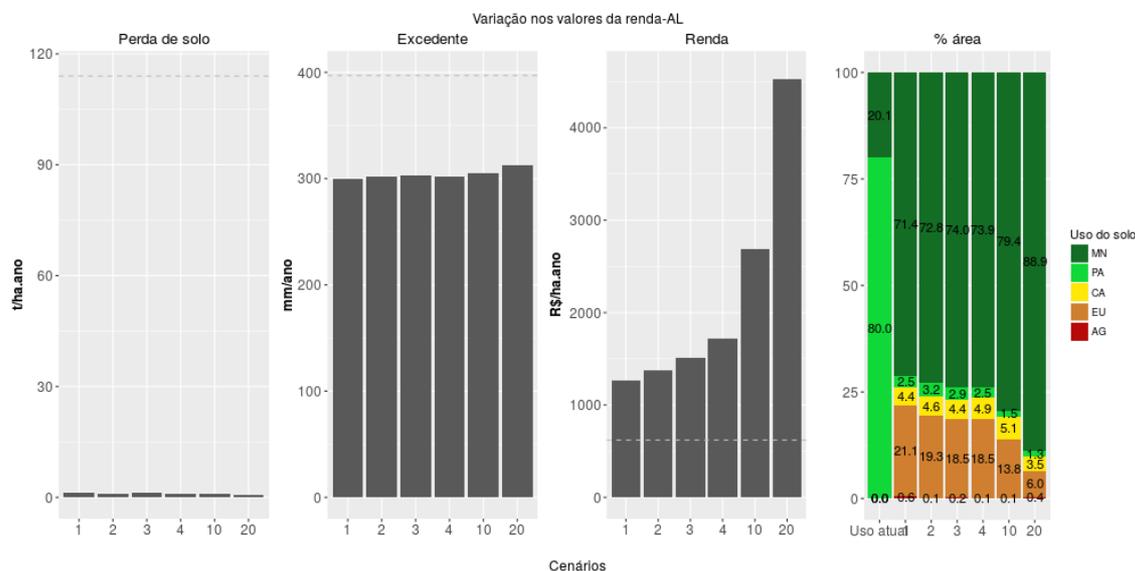
Fonte: o autor.

#### 5.2.1.4 Variação na renda da mata nativa

O cenário para avaliação do efeito do aumento na renda da mata nativa foi feito multiplicando-se o seu valor por 2, 3, 4, 10 e 20. Nestes cenários, aplicando os pesos AL, certamente há um aumento na renda bruta produzida na MbAL devido ao aumento da renda individual da mata nativa. Porém, as áreas ocupadas pela mata nativa só começam a aumentar quando a renda é multiplicada por valores acima de 10. Neste caso, o uso mata nativa começa a competir e ser mais vantajoso que o uso de áreas ocupadas com a cultura do eucalipto.

Essa mudança na renda da mata nativa não foi suficiente para gerar mudanças na perda de solo, haja visto que os valores já eram muito baixos, tão pouco na produção do excedente hídrico.

Figura 10 - Variação no valor da renda gerada pela mata nativa. Os escalares no eixo X representam o número de vezes que a renda da mata nativa foi multiplicada. Simulação utilizando ao pesos de Alegre determinado pelo método AHP e mantendo a restrição de classes de uso do solo.



Fonte: o autor.

## 5.2.2 Microbacia de Santa Leopoldina

A MbSL possui área de 1103,76 ha com 79,3% de sua área ocupada por mata nativa e o restante ocupado por pastagem (20,7%). A microbacia apresenta perda de solo na ordem de  $16,7 \text{ t ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ , excedente hídrico de  $331 \text{ mm ano}^{-1}$  e uma renda bruta de  $\text{R\$ } 328,7 \text{ ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ . Além disso, apresenta 9,5% de sua área como Classe 1, 29,0% como Classe 2 e 61,5% como Classe 3.

### 5.2.2.1 Análise de sensibilidade

Na Figura 11 são apresentados os gráficos com valores de perda do solo ( $\text{t ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ ), excedente ( $\text{mm ano}^{-1}$ ) e renda bruta ( $\text{R\$ ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ ) para a MbSL após aplicação da otimização respeitando as restrições de classe de uso da terra. Nesta análise ocorre variação no eixo x dos pesos que foram atribuídos à cada variável a fim de identificar o comportamento individualizado das mesmas.

No primeiro conjunto de gráficos (primeira linha de gráficos) ocorre a mudança dos pesos apenas na variável PS. Na segunda linha é apresentado a variação apenas na variável EXC e por último a mudança na variável RE. Os pesos variam em 2, 3, 5 e 10, para a

variável em questão, sendo representado pelas letras B, C, D e E, respectivamente. A letra A indica peso 1 para todas as três variáveis.

O aumento de pesos na variável PS causa a diminuição dos valores de perda de solo, ficando todos abaixo dos valores de referência. Embora, ao se aumentar os valores dos pesos para a variável PS ocorra diminuição da renda bruta, os valores atingidos tem grande aumento em relação ao uso atual da microbacia. Neste caso, o excedente hídrico não sofreu variação.

A medida que se aumenta o peso na variável PS há um aumento das áreas ocupadas por mata nativa em detrimento das áreas com pastagem. As áreas com eucalipto variaram pouco, permanecendo próximo à 25% da área da bacia.

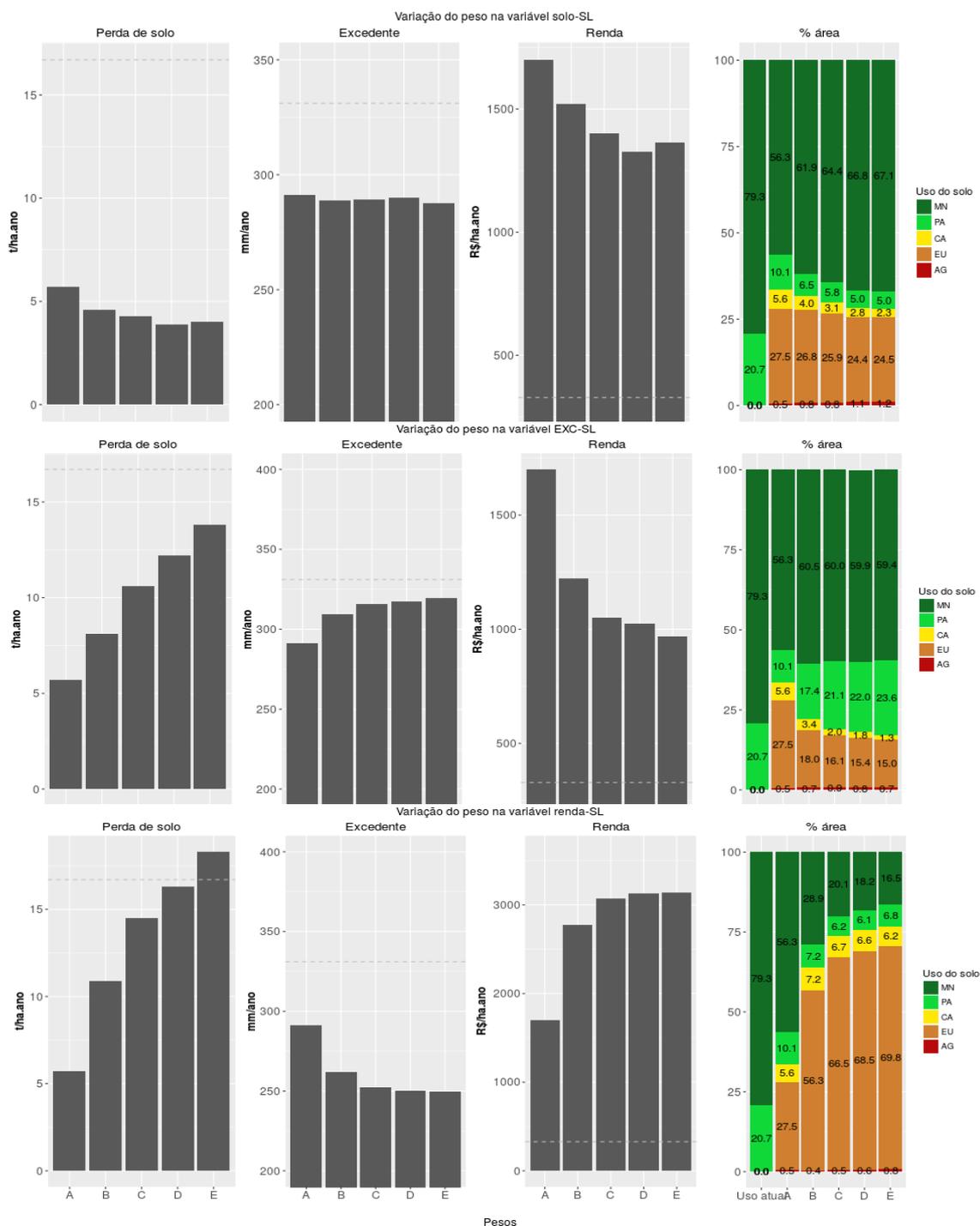
Quando se avalia o peso na variável EXC, tem-se um aumento na perda de solo, variando de 5,5 à 12,5 t ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>, assim como aumento do excedente hídrico produzido, podendo atingir valores próximos à 315 mm ano<sup>-1</sup>. À medida que se aumenta o peso na variável EXC há uma diminuição nas áreas ocupadas por eucalipto e café (atingindo 15% e 1,3% da área respectivamente). As áreas ocupadas por mata nativa permanecem praticamente constantes, cerca de 60% da área da microbacia de Santa Leopoldina e há um aumento das áreas de pastagem (chegando à 24%). O incremento do peso na variável EXC prejudicou a geração de renda na bacia de Santa Leopoldina.

Em todas as simulações a otimização aumentou a geração da renda bruta em relação ao uso atual na MbSL. Este aumento foi mais intensificado quando se atribuiu maiores pesos à variável RE. Quando foram aplicados pesos nas variáveis PS e EXC ocorreu uma diminuição da renda gerada à medida que os pesos foram aumentados, embora ainda fossem melhores que o valor atual.

O aumento dos pesos na variável RE gera um aumento na perda de solo atingindo valores acima do uso atual da microbacia (peso E), enquanto que o excedente decresce, estabilizando a partir do peso D. As áreas da microbacia passam a ser ocupadas por maiores áreas com eucalipto (cerca de 70%), seguida por áreas de mata nativa (16,5%).

Em todos os cenários houve pouco estabelecimento de áreas com agricultura (AG) principalmente por limitação das classes de uso. A MbSL possui apenas cerca de 9,5% de áreas na Classe 1, onde é permitido o uso da agricultura.

Figura 11 - Análise de sensibilidade aplicando pesos distintos por variável. A linha pontilhada representa o valor da variável no uso atual do solo. A = peso 1 para todas as três variáveis na função objetivo. B= peso 2 na variável a ser avaliada e 1 nas demais. C = peso 3 na variável a ser avaliada e 1 nas demais. D = peso 5 na variável a ser avaliada e 1 nas demais. E = peso 10 na variável a ser avaliada e 1 nas demais. SL = microbacia de Santa Leopoldina. % área = porcentagem da área da microbacia ocupada por determinado uso do solo.



Fonte: o autor.

### 5.2.2.2 Restrição de classes de uso e mata nativa fixa

Neste cenário pode ser avaliado o resultado do processo de otimização aplicando-se os pesos obtidos pela metodologia AHP, o efeito de se respeitar as classes de uso (gráfico “com classe”), como medida conservacionista, além do efeito da proteção da mata nativa (coluna SLM) mantendo fixa sua área original (Figura 12).

Ao se aplicar os pesos determinados pelo método AHP na bacia de Santa Leopoldina, respeitando as classes de uso da terra, houve redução dos valores de perda de solo quando comparado com a situação atual de uso. Adicionalmente, houve acréscimo na renda da bacia, superando a renda atual de R\$ 328,7 ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>.

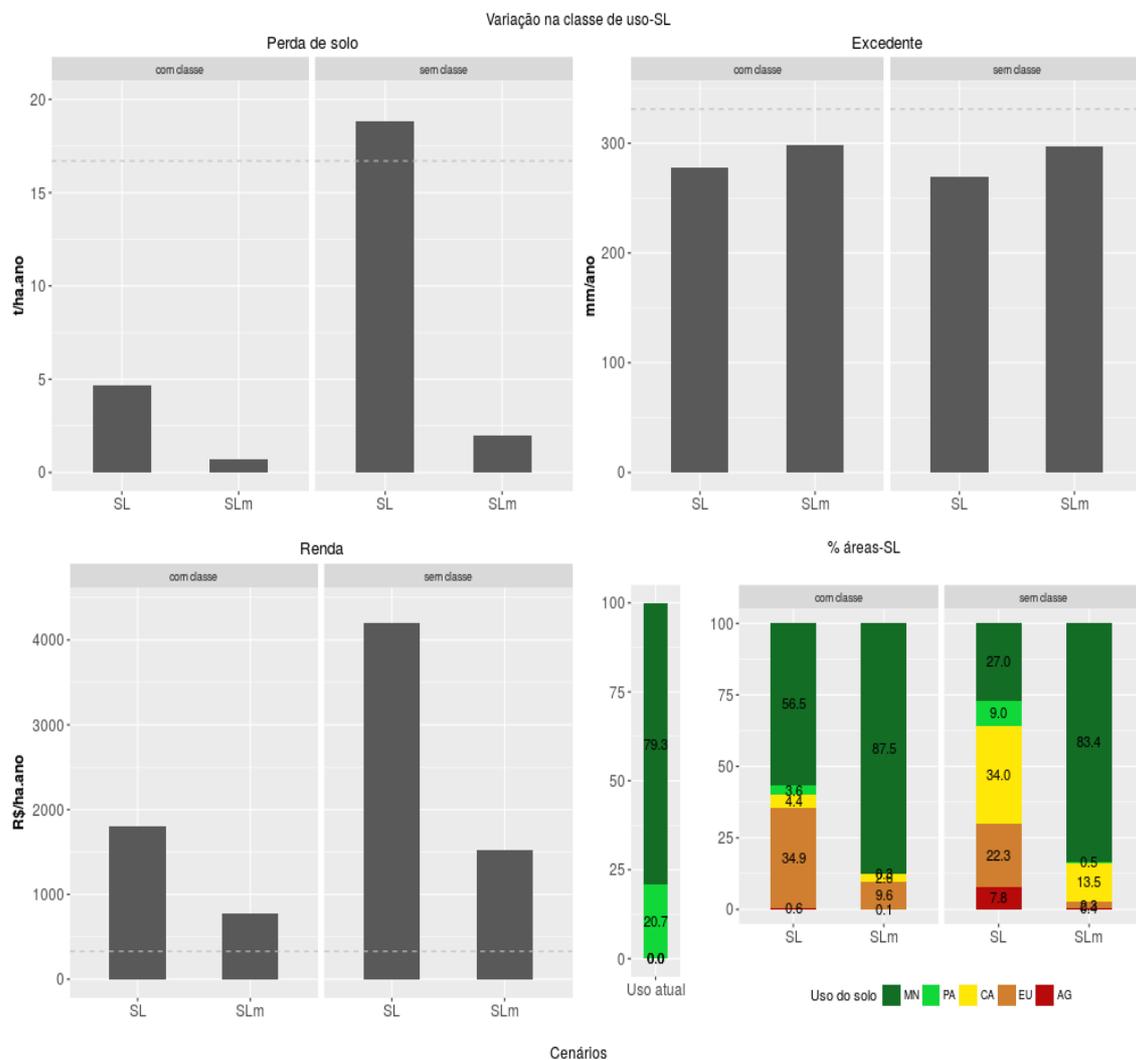
Houve grande mudança nos valores de perda de solo e na geração de renda quando foi retirada a restrição do uso da terra por classes de uso (gráficos “sem classe”), sem considerar a restrição por classe e permitindo a mudança de áreas originalmente ocupadas por mata nativa a PS supera os níveis atuais atingindo cerca de 19 t ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>.

A proibição do corte de mata nativa foi benéfica para o ambiente, refletindo em menor perda de solo e maior excedente, independente se estava com ou sem restrição de classes de uso da terra. Todavia, neste caso, houve grande diminuição da renda bruta gerada na MbSL.

A restrição por classe de uso da terra não apresentou efeito na variável EXC. Enquanto que a sua presença foi favorável à diminuição da perda de solo (benefício ambiental) e diminuição da renda bruta, principalmente evidenciado pela ausência da restrição de classe de uso.

Ao se avaliar o efeito conjunto da restrição de classe e da manutenção das áreas de mata nativa tem-se que o excedente permanece o mesmo (colunas SIm do gráfico de Excedente) contudo com mudança da configuração da microbacia. Neste caso há uma mudança de áreas ocupadas com eucalipto na microbacia por áreas de café, quando não há restrição de classe. Tal mudança, eleva os valores da renda para próximos à R\$ 1500 ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup> e a perda de solo para cerca de 2 t ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>.

Figura 12 - Avaliação da aplicação das restrições de classes de uso e da manutenção da área de mata nativa fixa. A linha pontilhada representa o valor da variável no uso atual do solo. SL = peso definido pelo método AHP para a microbacia de Santa Leopoldina. SLm = peso definido pelo método AHP para a microbacia de Santa Leopoldina, porém mantendo a área de mata nativa fixa (simulando a proibição de corte). Com classe = respeitando a restrição de classes de uso. Sem classe = sem restrição de classe de uso.



Fonte: o autor.

### 5.2.2.3 Variação na renda da mata nativa

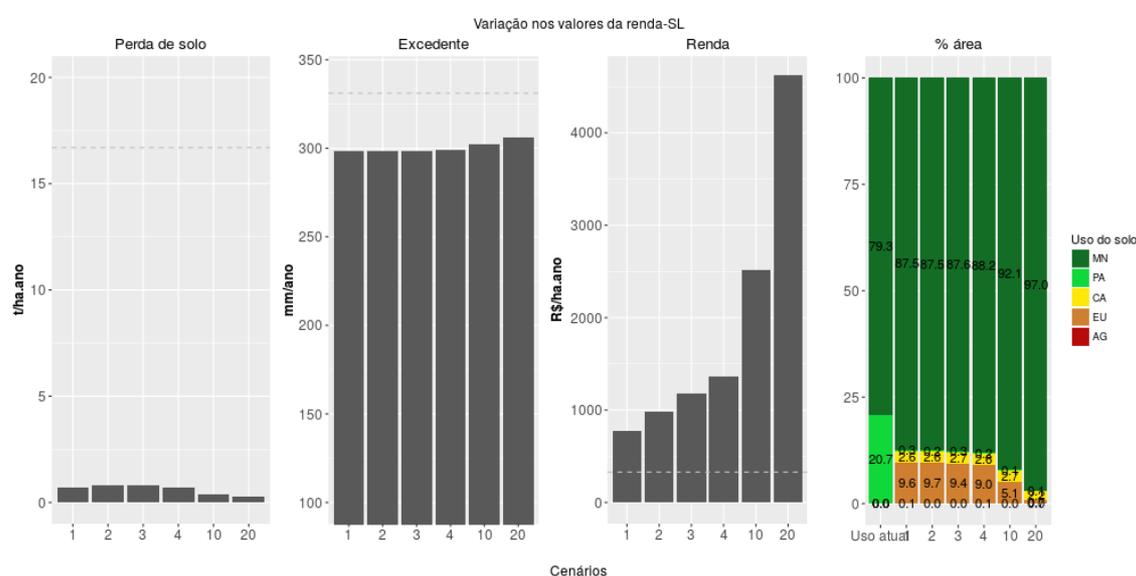
O cenário para avaliação do efeito do aumento na renda da mata nativa foi feito multiplicando-se o seu valor por 2, 3, 4, 10 e 20. Foi avaliada a aplicação do peso determinado pelo método AHP com a manutenção da área de mata nativa presente no uso atual em conjunto com a variação na renda bruta gerada pela mata nativa (Figura 13).

Este cenário manteve os valores de perda de solo próximos de zero. O aumento na renda da mata nativa não foi suficiente para alterar os valores de excedente hídricos

encontrados na MbSL, o quais continuaram abaixo do valor encontrado com o uso da terra atual da bacia.

A renda bruta gerada na microbacia aumentou na medida que se aumentou o valor individual da renda da mata nativa. Quanto a configuração final da bacia, só houve mudança quando a mesma foi multiplicada por 10 ou 20. Nestes casos a área de mata nativa foi superior à 90% da área da microbacia.

Figura 13 - Variação no valor da renda gerada pela mata nativa. Os escalares no eixo X representam o número de vezes que a renda da mata nativa foi multiplicada. Simulação utilizando ao pesos de Santa Leopoldina determinado pelo método AHP e mantendo a restrição de classes de uso do solo.



Fonte: o autor.

### 5.2.3 Microbacia de São Mateus

A MbSM possui área de 774,36ha sendo 13,1% de sua área ocupada por mata nativa, 24,6% de pastagem, 54,4% de eucalipto e 7,9 de agricultura. A microbacia apresenta perda de solo na ordem de  $1,7 \text{ t ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ , excedente hídrico de  $173 \text{ mm ano}^{-1}$  e uma renda bruta de  $\text{R\$ } 1978,02 \text{ ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ . Além disso, apresenta 96,8% de sua área como Classe 1, 2,9% como Classe 2 e 0,3% como Classe 3.

#### 5.2.3.1 Análise de sensibilidade

Na figura 14 são apresentados os gráficos com valores de perda do solo ( $\text{t ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ ), excedente ( $\text{mm ano}^{-1}$ ) e renda bruta ( $\text{R\$ ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ ) para a MbSM após aplicação da

otimização respeitando as restrições de classe de uso da terra. Nesta análise ocorre variação no eixo x dos pesos que foram atribuídos à cada variável a fim de identificar o comportamento individualizado das mesmas.

No primeiro conjunto de gráficos (primeira linha de gráficos) ocorre a mudança dos pesos apenas na variável PS. Na segunda linha é apresentado a variação apenas na variável EXC e por último a mudança na variável RE. Os pesos variam em 2, 3, 5 e 10, para a variável em questão, sendo representado pelas letras B, C, D e E, respectivamente. A letra A indica peso 1 para todas as três variáveis.

O aumento de pesos na variável PS causou diminuição dos valores de perda de solo e dos valores de renda bruta gerado na microbacia. O excedente hídrico também diminuiu com o aumento do peso na variável PS, porém, com menor intensidade. À partir do cenário C o excedente diminui à valores abaixo da referência. À medida que se aumenta o peso na variável PS há um aumento das áreas ocupadas por mata nativa e eucalipto em detrimento das áreas ocupadas com pastagem e com café. As áreas ocupadas com agricultura sofrem pouca variação.

Nestes cenários, o aumento do peso em PS causou diminuição da perda de solo e do excedente hídrico quando comparado com o uso atual do solo. Enquanto que os valores de renda foram muito maiores dentre as variações de PS.

A variação dos pesos na variável excedente hídrico causa aumento da perda de solo, podendo ser maior que os valores do uso atual quando observado o cenário C. Com esse peso, a renda bruta se aproxima do valor atual, diminuindo à medida que este é aumentado, conforme cenários D e E, enquanto que o excedente hídrico aumentou, atingindo valores próximos à 225 mm ano<sup>-1</sup>.

Com o aumento do peso da variável EXC houve aumento do excedente produzido na microbacia de São Mateus. Neste contexto há um aumento das áreas ocupadas por pastagem e agricultura (em menor intensidade) em detrimento de áreas com café e eucalipto. Observando o cenário E, a microbacia apresentaria cerca de 60% de áreas ocupadas com pastagem seguida de áreas com mata nativa (19%). O eucalipto ocuparia a menor área neste cenário, ou seja, 7,2% da microbacia de São Mateus.

Quando se aumenta o peso na variável RE ocorre aumento da perda de solo, embora este aumento não atinja os valores observados no uso atual do solo. Concomitantemente, ocorre aumento dos valores da renda bruta, atingindo valores muito superiores ao uso

atual. O excedente hídrico diminui quando comparado como uso atual chegando a 160 mm ano<sup>-1</sup>.

Com o aumento do peso da variável RE tem-se aumento de áreas ocupadas por cafezais (51%), seguido por áreas de eucalipto (18,5%) e mata nativa (11,1%), porém, esses dois tem diminuição de áreas quando comparado ao uso atual do solo. Além disso, há diminuição das áreas ocupadas por pastagem.

#### 5.2.3.2 Restrição de classes de uso e mata nativa fixa

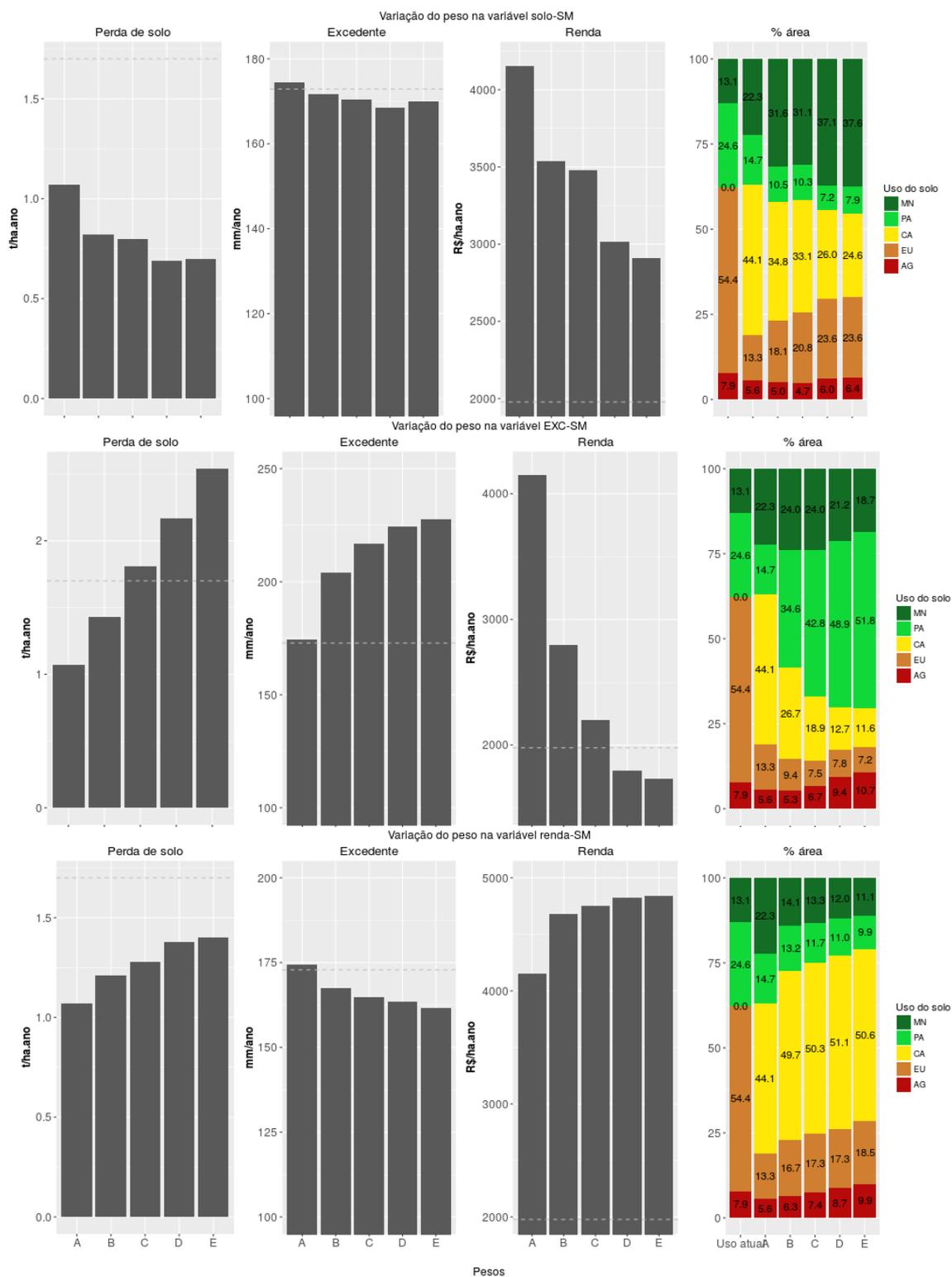
A aplicação do peso, determinado pelo método AHP causou grande aumento do excedente hídrico na MbSM quando comparado ao uso atual do solo. Adicionalmente, houve pequeno aumento da perda de solo e redução da renda bruta gerada na microbacia (Figura 15).

Neste cenário há uma redução das áreas ocupadas por eucalipto, chegando à 7% da área da microbacia, enquanto que a área de pastagem praticamente dobra, chegando à 51%. Há um aumento das áreas de agricultura e de mata nativa.

A MbSM não apresentou diferenças quanto à utilização das restrições por classe de uso, podendo ser constatado comparando-se os gráficos “com classe” e “sem classe” da Figura 15.

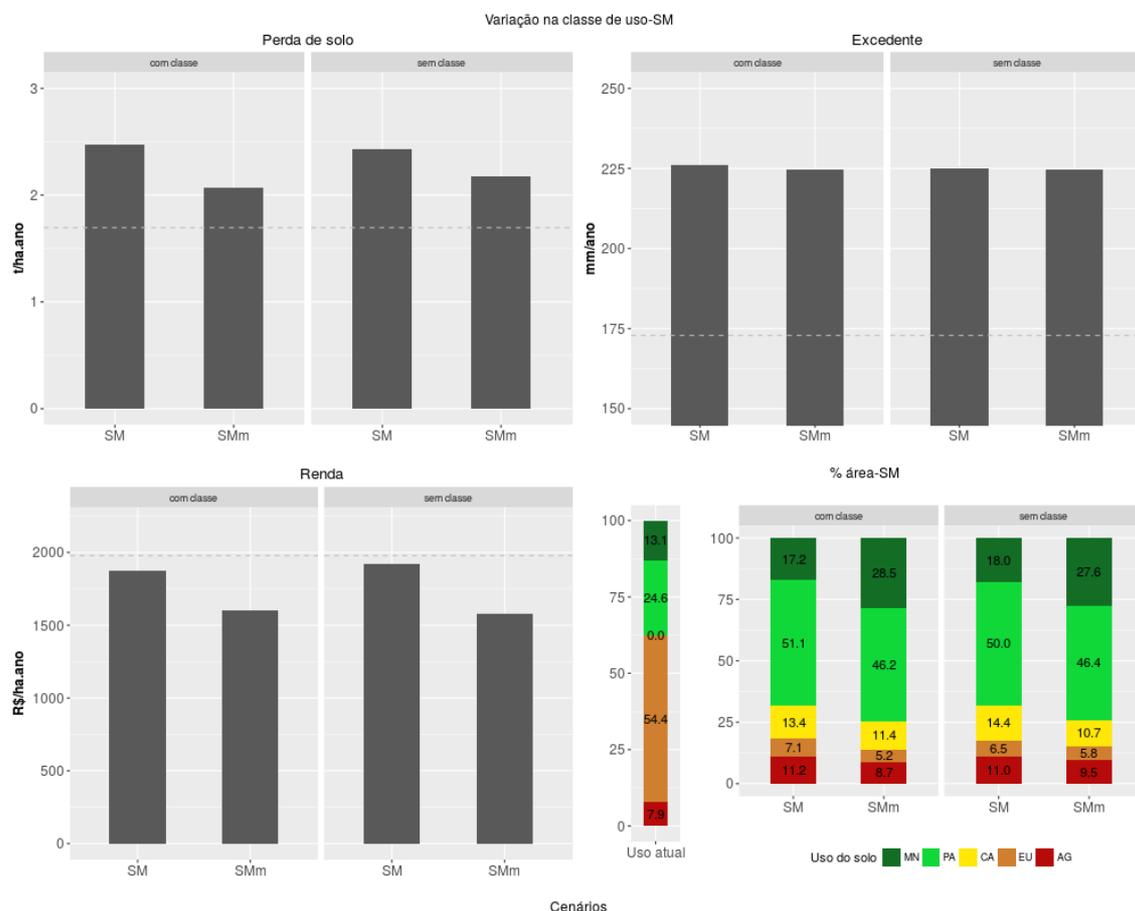
A manutenção das áreas originalmente ocupadas por mata nativa favoreceu a diminuição da perda de solo (fator positivo ambientalmente), além de favorecer a diminuição da renda bruta na MbSM. O excedente hídrico não apresentou variação quando foram mantidas as áreas originais de mata nativa. Ao se manter essas áreas com mata nativa, houve um aumento da ocupação final da microbacia por esse uso em detrimento de todos os demais usos presentes na mesma.

Figura 14 - Análise de sensibilidade aplicando pesos distintos por variável. A linha pontilhada representa o valor da variável no uso atual do solo. A = peso 1 para todas as três variáveis na função objetivo. B= peso 2 na variável a ser avaliada e 1 nas demais. C = peso 3 na variável a ser avaliada e 1 nas demais. D = peso 5 na variável a ser avaliada e 1 nas demais. E = peso 10 na variável a ser avaliada e 1 nas demais. SM = microbacia de São Mateus. % área = porcentagem da área da microbacia ocupada por determinado uso do solo.



Fonte: o autor.

Figura 15 - Avaliação da aplicação das restrições de classes de uso e da manutenção da área de mata nativa fixa. A linha pontilhada representa o valor da variável no uso atual do solo. SM = peso definido pelo método AHP para a microbacia de São Mateus. SMm = peso definido pelo método AHP para a microbacia de São Mateus, porém mantendo a área de mata nativa fixa (simulando a proibição de corte). Com classe = respeitando a restrição de classes de uso. Sem classe = sem restrição de classe de uso.



Fonte: o autor.

### 5.2.3.3 Variação na renda da mata nativa

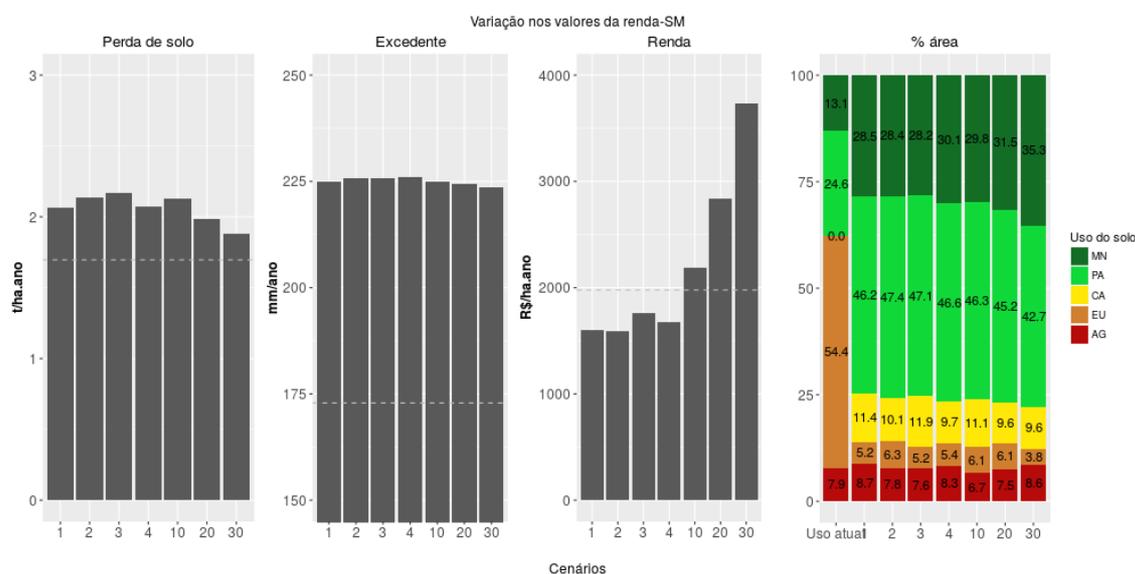
Foi avaliado a aplicação do peso determinado pelo método AHP com a manutenção da área de mata nativa presente no uso atual em conjunto com a variação na renda bruta gerada pela mata nativa na MbSM (Figura 16).

Os valores de perda de solo se mantiveram acima do valor de referência, embora este valor seja muito baixo (valores próximos à  $2 \text{ t ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ ). O aumento na renda da mata nativa não foi suficiente para alterar os valores de excedente hídricos encontrados na MbSM, o quais continuaram acima do valor encontrado com o uso da terra atual da bacia.

A renda bruta gerada na microbacia aumentou na medida que se aumentou o valor individual da renda da mata nativa, atingindo valores superiores à referência quando multiplicada por 10 ou valores superiores.

Houve um pequeno aumento das área ocupadas pela mata nativa quando sua renda individual foi aumentada em 20 e 30 vezes. Nestes casos, há diminuição das áreas ocupadas por pastagem e café. Embora estas áreas ainda sejam maiores do que quando comparadas ao uso atual da bacia.

Figura 16 - Variação no valor da renda gerada pela mata nativa. Os escalares no eixo X representam o número de vezes que a renda da mata nativa foi multiplicada. Simulação utilizando ao pesos de São Mateus determinado pelo método AHP e mantendo a restrição de classes de uso do solo.



Fonte: o autor.

## 5.2.4 Microbacia de Linhares

A MbLI possui área de 630,81ha com 4,8% de sua área ocupada por mata nativa, 87,9% de pastagem e 7,3% de agricultura. A microbacia apresenta perda de solo na ordem de  $4,6 \text{ t ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ , excedente hídrico de  $297 \text{ mm ano}^{-1}$  e uma renda bruta de  $\text{R\$ } 741,62 \text{ ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ . Além disso, apresenta 98,0% de sua área como Classe 1 e 2,0% como Classe 2.

### 5.2.4.1 Análise de sensibilidade

Na figura 17 são apresentados os gráficos com valores de perda do solo ( $\text{t/ha.ano}$ ), excedente ( $\text{mm ano}^{-1}$ ) e renda bruta ( $\text{R\$ ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ ) para a MbLI após aplicação da

otimização, respeitando as restrições de classe de uso da terra. Nesta análise ocorre variação no eixo x dos pesos que foram atribuídos à cada variável a fim de identificar o comportamento individualizado das mesmas.

No primeiro conjunto de gráficos (primeira linha de gráficos) ocorre a mudança dos pesos apenas na variável PS. Na segunda linha é apresentado a variação apenas na variável EXC e por último a mudança na variável RE. Os pesos variam em 2, 3, 5 e 10, para a variável em questão, sendo representado pelas letras B, C, D e E, respectivamente. A letra A indica peso 1 para todas as três variáveis.

O processo de otimização diminuiu a perda de solo e o excedente hídrico na MbLI, porém aumentou a renda quando comparado com o uso atual da terra. Ocorreu diminuição das áreas ocupadas previamente por pastagem e o aumento de áreas com mata nativa. Além da utilização de áreas com café e eucalipto, que não estavam presentes na área anteriormente.

A aplicação de pesos na variável PS diminuem os valores de perda de solo à próximos de 1 t/ha.ano. O aumento desses pesos também diminuem os valores da renda bruta, embora os valores se mantiveram acima da referência do uso atual. Valores de excedente hídrico não variaram com o aumento do peso em PS, se mantendo abaixo do valor de referência, cerca de 200 mm ano<sup>-1</sup>. A medida que se aumenta o peso em PS, há um aumento da área ocupada por mata nativa e eucalipto, assim como diminuem as áreas de pastagem e café.

A variação dos pesos aplicados na variável EXC manteve os valores de perda de solo e excedente hídrico abaixo dos valores de referência (uso atual do solo) enquanto que o valor da renda bruta se manteve acima desse valor. O aumento do peso do EXC causa aumento da perda de solo e do excedente hídrico porém, ocorre diminuição do valor da renda gerada na MbLI. À medida que se aumenta o peso há um aumento das áreas de pastagem e agricultura, atingindo respectivamente 44% e 11% da área da microbacia. Há uma diminuição das áreas de café, chegando à cerca de 14% da área.

O aumento dos pesos na variável RE mantém os valores de renda e excedente hídrico abaixo dos valores de referência enquanto que os valores de renda bruta da bacia aumentam consideravelmente.

Com a variação do peso em RE aumenta a área ocupada por café e agricultura chegando à 46% e 12%, respectivamente. Concomitantemente, ocorre diminuição das área

ocupadas por mata nativa e pastagem, embora a área de mata nativa seja maior do que a referência (uso atual do solo). As áreas ocupadas por eucalipto se mantêm em aproximadamente 20% da área da microbacia.

#### 5.2.4.2 Restrição de classes de uso e mata nativa fixa

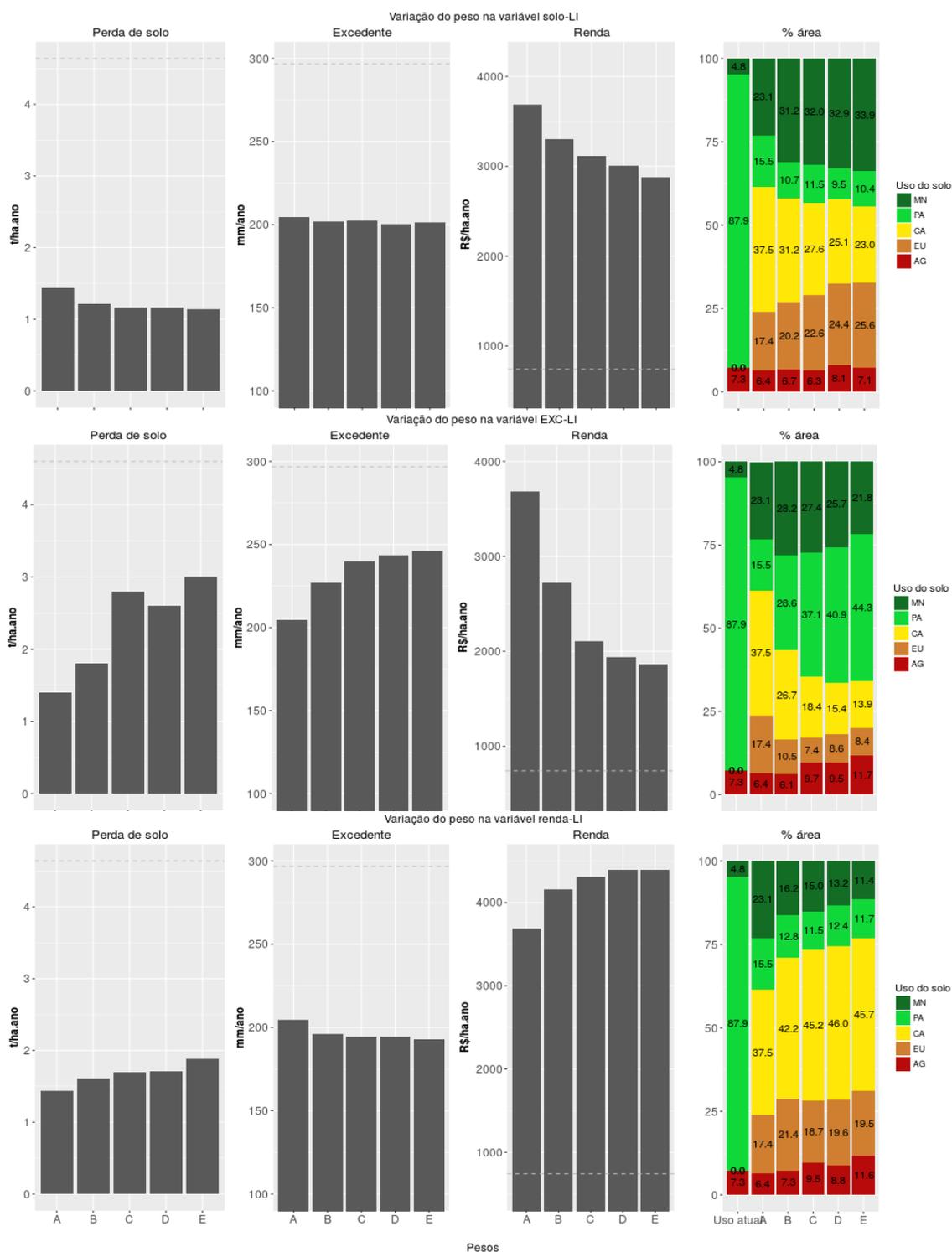
A aplicação dos pesos, determinado pelo método AHP, priorizando o aumento do excedente hídrico, diminuiu a perda de solo na MbLI quando comparado ao uso atual do solo (Figura 18). Embora o excedente hídrico tenha se mantido abaixo do valor de referência (cerca de  $260 \text{ mm ano}^{-1}$ ).

Em contrapartida, houve aumento da renda bruta. Neste cenário a paisagem da MbLI apresenta diminuição de metade da área ocupada por pastagens e aumento dos demais usos. As áreas com mata nativa e café passam a ocupar cerca de 17% e 21% da área da microbacia.

Na microbacia de Linhares não se observa diferença entre o uso das restrições de classe para ocupação do uso da terra (representado pelos gráficos “com classe” e “sem classe” da Figura 18).

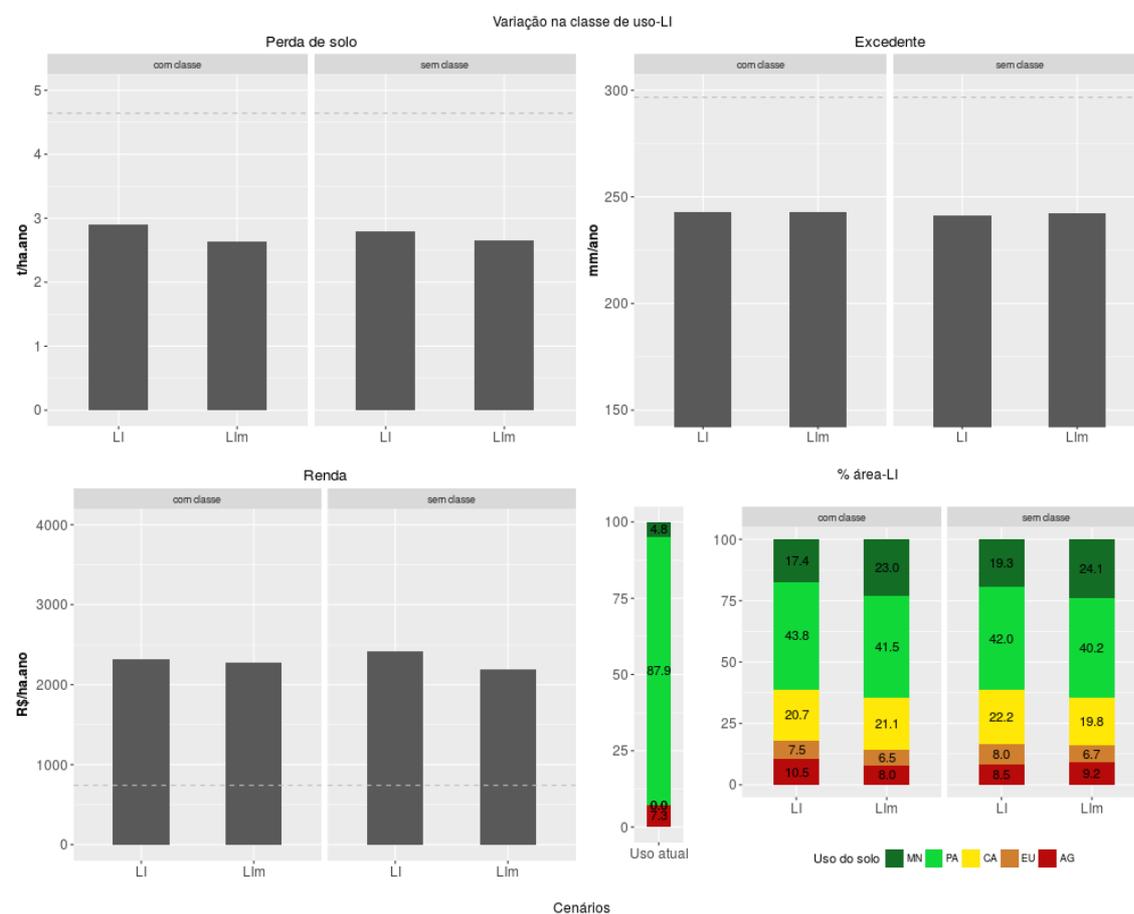
Da mesma forma, pouca diferença se observa quando se mantém as áreas originalmente ocupadas por mata nativa. Ao se comparar a proibição do corte de áreas de mata nativa (representada pelos gráficos “LIm”) tem-se pequeno aumento das áreas de mata nativa em detrimento de áreas de pastagem na MbLI.

Figura 17 - Análise de sensibilidade aplicando pesos distintos por variável. A linha pontilhada representa o valor da variável no uso atual do solo. A = peso 1 para todas as três variáveis na função objetivo. B= peso 2 na variável a ser avaliada e 1 nas demais. C = peso 3 na variável a ser avaliada e 1 nas demais. D = peso 5 na variável a ser avaliada e 1 nas demais. E = peso 10 na variável a ser avaliada e 1 nas demais. LI = microbacia de Linhares. % área = porcentagem da área da microbacia ocupada por determinado uso do solo.



Fonte: o autor.

Figura 18 - Avaliação da aplicação das restrições de classes de uso e da manutenção da área de mata nativa fixa. A linha pontilhada representa o valor da variável no uso atual do solo. LI = peso definido pelo método AHP para a microbacia de Linhares. LIm = peso definido pelo método AHP para a microbacia de Linhares, porém mantendo a área de mata nativa fixa (simulando a proibição de corte). Com classe = respeitando a restrição de classes de uso. Sem classe = sem restrição de classe de uso.



Fonte: o autor.

### 5.2.4.3 Variação na renda da mata nativa

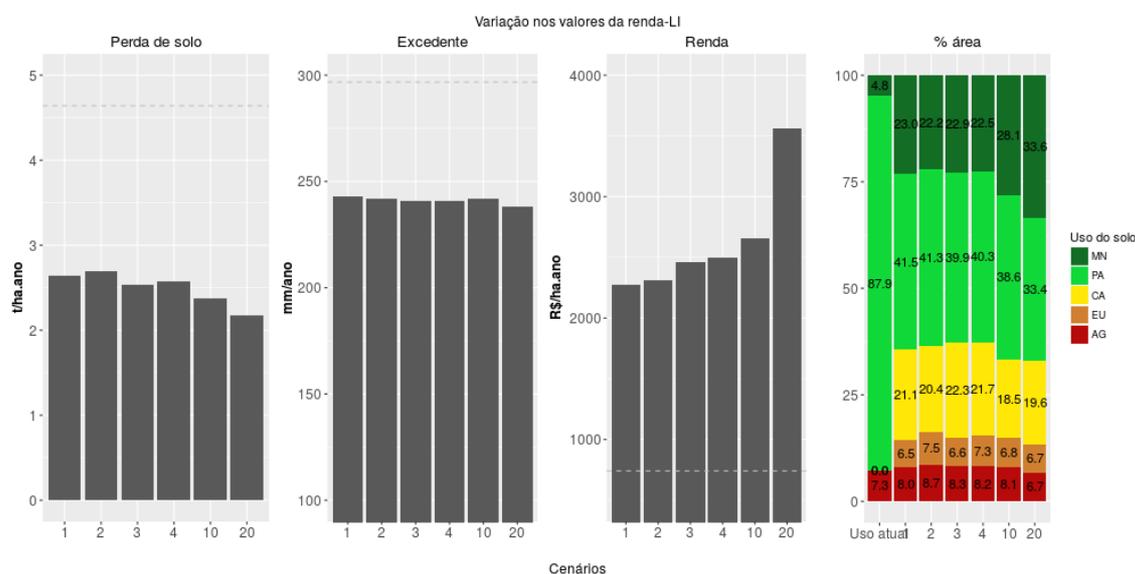
Foi avaliado um cenário com a aplicação do peso determinado pelo método AHP, manutenção da área de mata nativa presente no uso atual, restrição das classes de uso da terra em conjunto com a variação na renda bruta gerada pela mata nativa na MbLI (Figura 19).

Os valores de perda de solo se mantiveram abaixo do valor de referência. O aumento na renda da mata nativa não foi suficiente para alterar substancialmente os valores de excedente hídricos encontrados na MbLI, o quais se mantiveram abaixo do valor encontrado com o uso da terra atual da bacia.

A renda bruta gerada na microbacia aumentou na medida que se aumentou o valor individual da renda da mata nativa, mantendo-se acima do valor de referência.

Houve um pequeno aumento das área ocupadas pela mata nativa quando sua renda individual foi aumentada em 10 e 20 vezes. Nestes casos, houve diminuição das áreas ocupadas por pastagem e café. Embora este último se mantém acima do valor de referência (20% da área da microbacia), enquanto que aquele diminui à praticamente um terço do valor de uso atual do solo (33%). As áreas de mata nativa atingem cerca de 34% da área da MbLI.

Figura 19 - Variação no valor da renda gerada pela mata nativa. Os escalares no eixo X representam o número de vezes que a renda da mata nativa foi multiplicada. Simulação utilizando ao pesos de Linhares determinado pelo método AHP e mantendo a restrição de classes de uso do solo.



Fonte: o autor.

### 5.3 Discussão geral do método

#### Visão geral do método

A bacia hidrográfica é considerada uma unidade de gestão (BRASIL, 1987) e uma unidade socioecológica onde são encontradas as relações entre clima, solo, organismos e aspectos socioeconômicos (Resende *et al.*, 2014).

O uso da técnica de otimização em conjunto com a análise AHP implementado neste método se mostrou eficiente para a aplicação no planejamento ambiental em bacias hidrográficas. O método foi capaz de considerar três variáveis distintas de maneira integrada, além de representar diferentes objetivos no planejamento ambiental.

O método proposto neste trabalho apresentou grande escopo de aplicação. O mesmo foi aplicado em quatro microbacias com características diversas, como variação de relevo, dados climáticos e histórico de uso do solo.

O usuário tem a possibilidade de simular diversos cenários como a criação de novas classes de uso com distintas restrições, incluir ou eliminar culturas a serem avaliadas no planejamento. Devem ser consideradas apenas culturas que apresentem aptidão para a região, conforme levantamento do zoneamento agroclimatológico disponibilizado na literatura.

Adicionalmente, podem ser feitas simulações quanto à proibição de corte de áreas de vegetação nativa ou troca de determinadas culturas que atendam à demanda específica de alguma região, como a produção de alimentos.

A metodologia AHP utilizada como suporte nesta proposta permitiu a flexibilização de abordagens sujeitas a julgamento/avaliação de especialistas. Esta abordagem representa as necessidades regionais, relaciona condições ambientais e sociais em um mesmo patamar e permite o direcionamento de políticas públicas específicas.

O foco do planejamento pode ser direcionado por diferentes pesos aplicados nas variáveis (item 5.2.1.2). Os pesos determinados para as microbacias MbSL, MbSM e MbLI (baseados nas características locais e na interpretação de especialistas) foram aplicados na MbAL e observado o efeito dessas intenções (representadas pelos pesos) na PS, no EXC, na RE e principalmente na configuração final da bacia hidrográfica. Assim, cabe ao tomador de decisão o posicionamento final quanto ao planejamento.

A aplicação dos pesos Psm e Pli resultou em uma paisagem dominada por áreas de vegetação nativa e pastagem, tanto quando foi respeitada a restrição de classe, quanto essa determinação foi ignorada. Porém, houve um predomínio de áreas de vegetação nativa (60%) com o respeito à restrição de classes, enquanto que apenas 16% da área da bacia foi ocupada com mata quando essa restrição foi ignorada (Figura 8).

Além de configurações para adequar a metodologia ao problema real, a estrutura do programa desenvolvido permite ao usuário fazer várias adaptações em busca de melhores resultados na otimização. Os parâmetros apresentados na Tabela 1 podem ser ajustados de acordo com o interesse do usuário e estão ligados à eficiência do método em encontrar melhores e mais rápidas soluções para o problema.

A utilização de AGe exige primeiramente a geração da população inicial e essa criação é extremamente importante, pois sua configuração pode levar ao ótimo local limitando a solução do problema (Matthews, Sibbald e Craw, 1999; Cao et al., 2012). A população deve ser numerosa para que se justifique a utilização dessa ferramenta de alta complexidade (Linden, 2008).

O ajuste dos parâmetros dos algoritmos genéticos como o tamanho da população, o tipo de *crossover* e a mutação são desafios para o usuário que deve realizar o ajuste mais fino e a busca por melhores resultados (Schwaab et al., 2017).

A metodologia proposta tem uma visão holística do planejamento ambiental de bacias ou mesmo propriedades rurais que depende da escala espacial de interesse e da disponibilidade de dados e entrada.

Os métodos de planejamento do uso da terra se baseiam em informações básicas que são fornecidos como dados de entrada. Com os dados são implementadas as ferramentas de tomada de decisão (multi-critério) e de otimização de uso da terra.

As limitações/características adotadas pelo método proposto ressaltam a importância de se representar melhor as bacias através de dados de campo mais representativos. O estabelecimento de áreas preferenciais para implantação de culturas ocorre através da espacialização das informações de base.

### **Dados de entrada**

As MbAL e MbSL apresentaram as maiores precipitações durante o período avaliado assim como os maiores valores de EXC. Essas bacias estão localizadas em região acidentada com a maior parte da área na classe de declividade 3 (maior que 40%) que contribui diretamente para a perda de solo da região.

Em todas as microbacias ao se aumentar os pesos da variável excedente tem-se um aumento do EXC e da PS gerados enquanto que há uma redução da RE. Fica evidente a dualidade entre a geração de EXC e a proteção do solo contra processos erosivos.

Exceto para a MbSL, o aumento do peso na variável EXC causa um aumento da área ocupada por vegetação nativa, seguida por uma diminuição a partir dos cenários B e C apresentados nas Figuras 7, 14 e 17. Pode ser observado um constante aumento da área ocupada por pastagem (haja visto a pastagem ser a cultura que gerou o maior excedente hídrico – Tabelas 18 e 19).

A mudança de áreas com pastagem para áreas de vegetação nativa ou eucalipto causa um aumento médio da evapotranspiração de 15 a 20%, respectivamente (Tabelas 17 e 18). Estes valores se aproximam de valores citados na literatura, que em média ocorre um aumento de 30% da evapotranspiração quando há substituição de áreas de pastagem por florestas (Sirimarco *et al.*, 2018).

As mudanças na cobertura florestal modificam a recarga de água subterrânea e consequentemente o fluxo de base. Normalmente é esperado que a retirada de áreas de floresta aumentem o fluxo de base, uma vez que diminui a evapotranspiração (Li *et al.*, 2016).

Há trabalhos avaliando a mudança do uso da terra e o efeito conjunto da variação no clima, sendo este em muitos casos o causador da alteração na variável hidrológica (Li *et al.*, 2018). A utilização de uma longa série histórica de dados climáticos (35 anos, utilizadas neste estudo) apresenta boa representatividade das variáveis climáticas reforçando, assim, a utilização dos dados do excedente hídrico obtido pelo balanço hídrico como indicativo da disponibilidade hídrica.

As florestas exercem diferentes funções dependendo de sua posição no relevo, como áreas de topo de morro, áreas de encostas, assim como áreas ripária. Nesse contexto elas desempenham papel importante na manutenção das funções hidrológicas e ecológicas na paisagem (Tambosi *et al.*, 2015).

Além da localização das áreas de mata interferir nos componentes hidrológicos, a sua estrutura também exerce papel fundamental nesta dinâmica. De acordo com Ilstedt *et al.* (2016), áreas com ocupação intermediária de florestas são mais favoráveis à manutenção dos lençóis freáticos. A própria estrutura da floresta, com o dossel, presença de sub-bosque, interfere nestas variáveis, por meio da interceptação, infiltração, menor escoamento superficial e evapotranspiração.

Ao se avaliar a recarga de água subterrânea em duas bacias distintas, uma com eucalipto e outra com pastagem, Dean *et al.* (2015) observaram que dentro das bacias existem locais de maior recarga do lençol freático. Essas regiões se localizam em áreas mais baixas e próximas às linhas de drenagem, sendo assim não recomendadas para o plantio de eucalipto, cuja bacia apresentou diminuição dos nível do lençol. Adicionalmente, os autores não observaram uma estabilização do nível do lençol após período de avaliação

de 5 anos, o que sugere um constante declínio ao se considerar plantios de eucalipto de curta rotação.

Em muitos casos o aumento da cobertura florestal aumenta a evapotranspiração real e resulta na diminuição dos fluxos de água; porém, é importante ressaltar que há, concomitantemente o aumento das condições que favorecem a infiltração e diminuem o escoamento (conforme os valores de precipitação efetiva apresentados nas Tabelas 17 e 18). Desta forma, as áreas de mata nativa apresentaram baixos valores de ES, apenas cerca de 2%, enquanto que áreas com pastagem perderam mais de 10% da precipitação.

Faz-se necessário considerar que a metodologia proposta neste trabalho utiliza o método do NC para o cálculo do escoamento superficial. Este, embora muito utilizado na literatura, apresenta limitações quanto à representatividade de seus valores junto as condições da cobertura florestal como parâmetros de idade, sub-bosque, e variedade de espécies (Amatya, Skaggs e Trettin, 2009). Supõe-se uma subestimação destes valores quando é considerado o uso de pastagens, que geralmente apresentam-se degradadas em nossa região.

Este trabalho adotou a proposta de Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005) para a classificação hidrológica dos solos brasileiros, por melhor se aplicar a realidade do país. Faz-se o enquadramento dos solos, em nível de ordem por grupos hidrológicos e apresentam-se as características físicas dos mesmos. Muito embora a metodologia seja adaptada para a classificação do grupo hidrológico, persiste a limitação da representatividade dos valores de CN propostos pelo método original com as condições brasileiras.

Foi proposto um ajuste nos valores de CN com a finalidade de diminuir as diferenças entre a classificação original do método CN, que considera uma pastagem bem formada, e a qualidade das pastagens observadas na região (geralmente degradadas). Nas áreas que apresentavam pastagem o solo foi classificado em um grupo hidrológico diretamente inferior à classificação proposta por Sartori (2004).

A representatividade da região de estudo com riqueza de detalhes favorece o planejamento da microbacia. Como observado na Tabela 17, a MbSL apresenta dois tipos de solo: Latossolo e Cambissolo. Em áreas com Cambissolo a produção de excedente foi menor do que nas áreas com Latossolo, embora o valor da CAD fosse o mesmo para os dois (Tabela 12). A diferença foi atribuída à classificação do grupo hidrológico em que se

encontram: Latossolo, grupo hidrológico A, enquanto que Cambissolo é grupo hidrológico C (maior escoamento superficial).

Conforme diferença apresentada entre os solos na MbSL, poderiam ser implantados nas áreas de menor EXC as culturas que de fato consumissem maior parte do recurso hídrico.

Ao avaliar o comportamento hídrico de uma microbacia com cobertura predominante de eucalipto, Trevisan et al. (2012) constatou que apenas 2% do total precipitado foi escoado, 14% interceptado e cerca de 61% foi evapotranspirado.

Corroborando com os valores de escoamento apresentados neste trabalho (Tabelas 18 e 19), Fujieda et al. (1997), ao analisar os processos hidrológicos em microbacias com cobertura florestal da Mata Atlântica, constatou praticamente ausência de escoamento superficial, mesmo sendo áreas inclinadas, enquanto que a evapotranspiração ficou em cerca de 30% do balanço hídrico e 59% da precipitação como fluxo de base.

O baixo valor de excedente apresentado neste trabalho pela cultura do eucalipto é resultado do maior valor da CAD, que tem relação com a profundidade das raízes (consideradas nesse caso  $Z = 3\text{m}$ , a maior entre os usos). O volume de solo explorado pelas raízes dessa cultura se torna maior que as demais, aumentando assim a evapotranspiração real da cultura (no período de estiagem).

Tal situação está de acordo com vários autores que correlacionam a diminuição das vazões com o aumento de plantios florestais devido ao aumento da evapotranspiração. Vale ressaltar que o fato de possuir sistema radicular mais profundo funciona como uma estratégia para absorção de água à maiores profundidades e contribui para a sobrevivência das espécies em períodos de seca (Christina *et al.*, 2017).

Embora a biomassa de raízes seja pequena abaixo de 1m, Stahl et al. (2013) constataram a importância da absorção de água em profundidade por espécies tropicais como estratégia de resistência à períodos de seca. Há evidências que a absorção pode ocorrer a profundidades abaixo de 1,2 m, porém a média observada foi de 1,0 m, que é o mesmo valor adotado neste trabalho para vegetação nativa.

Aos 2 anos (área também ocupada por eucalipto previamente) os plantios de eucalipto apresentam raízes à profundidade de 10,0 m, que permite acesso à grande quantidade de água no solo, refletindo em grande produtividade da espécie nesta idade (Christina *et al.*, 2017). Embora, Almeida e Soares (2003) relatam que a profundidade média das raízes

do eucalipto com 4 anos na região de Aracruz-ES é de aproximadamente 2,5 m, valor este, próximo ao usado neste método (3,0 m).

Apesar dos diversos relatos negativos do efeito evapotranspiração da floresta sobre o rendimento hídrico, Boers et al. (2017) em uma abordagem conceitual, observaram relação positiva da evapotranspiração com a precipitação na floresta amazônica. A mudança de uso do solo de floresta para outras culturas, como pastagem, causam diminuição na evapotranspiração que diminui a umidade acima dessas áreas. Esta diminuição pode modificar o regime de chuvas na própria área mas também em outras áreas situadas na direção predominante dos ventos causando secas na região. A floresta funciona reciclando a umidade atmosférica oriunda de sua evapotranspiração.

Há a necessidade de se associar outras variáveis na tentativa de referendar a relação entre aumento da evapotranspiração com a diminuição do rendimento hídrico (Vanclay, 2009). As plantações florestais modificam as condições hidrológicas do solo que muitas vezes é ocupado anteriormente por pastagens que o compactam e diminuem a infiltração.

Vanclay (2009) sugere a pesquisa do efeito de técnicas de manejo florestal e da paisagem que melhorem o uso da água pelas mesmas florestas. A velocidade do vento, fator que influencia a evapotranspiração potencial, poderia ser diminuída por meio do manejo via implantação de quebra-vento. Tais abordagens retratariam melhor as informações ambientais da bacia e implementariam o método proposto.

Ao avaliar a Figura 12, é possível observar que a manutenção de áreas com floresta na MbSL permitiu um aumento do excedente hídrico nas mesmas. Isto ocorreu principalmente por esta região ser muito acidentada e composta em grande parte por áreas da classe de uso 3, onde é permitida apenas a ocupação com mata nativa e com plantios de eucalipto (menor valor de EXC). Desta forma, ao se proibir o corte de áreas com mata, diminui-se a chance de implantar cultivos de eucalipto na região, especialmente na MbSL onde a área de floresta atual é de aproximadamente 80%.

Entretanto, nas demais microbacias (MbAL, MbSM e MbLi) não foi observado variação no EXC embora tenha ocorrido aumento das áreas de mata nativa quando seu corte foi proibido. Faz-se necessário adicionar informações dos gráficos de sensibilidade com pequeno aumento das áreas de mata nativa seguido de sua diminuição, à medida que se aumenta os pesos na variável EXC.

Ao analisar 169 artigos, Filoso et al. (2017) apresentam uma revisão com o objetivo de avaliar a relação entre a restauração florestal com a produtividade hídrica. Cerca de 80% dos trabalhos apresentaram uma relação negativa, ou seja, diminuição do rendimento hídrico com a expansão da cobertura florestal. Apenas 6% apresentaram efeito positivo, enquanto que os demais trabalhos não apresentaram relação ou esta não foi claramente detectada. Um percentual menor (63%) dos artigos relatou diminuição do fluxo de base com a recuperação florestal.

De acordo com Filoso et al. (2017), na maioria dos casos de expansão florestal houve diminuição dos picos de vazão e enchentes, aumento da capacidade de infiltração de água no solo, embora ocorra uma redução nos níveis de água subterrânea (observações em bacias pequenas e em um período de tempo inferior a 10 anos). Quanto maior a bacia e o tempo de avaliação do estudo, menor era a diminuição do rendimento hídrico com o incremento de áreas florestadas. Desta forma, pode-se presumir que o efeito hídrico benéfico do aumento da vegetação nativa seria alcançado à longo prazo e quando avaliado em um contexto de grandes bacias hidrográficas.

Não há um consenso sobre os impactos das florestas no ciclo hidrológico, todavia é preciso enfatizar sua importância além da produção hídrica. Benefícios como redução dos picos de vazão, regulação de enchentes, estoques de carbono e principalmente, habitat da biodiversidade, devem ser considerados e atrelados às externalidades positivas, resultantes da expansão florestal. Assim, é importante avaliar cada região/bacia para um planejamento específico de acordo com suas demandas.

Deve-se considerar que a ocupação de áreas, geralmente degradadas, com plantios florestais ou mesmo outras culturas, podem não resultar em melhora no rendimento hídrico pois muitas vezes tais áreas estão com as propriedades do solo comprometidas devido ao uso do solo que o antecedeu. O benefício hídrico esperado pode não ser atingido devido às questões relacionadas ao manejo das áreas, como preparo do solo e colheita (Filoso *et al.*, 2017).

A variável  $E_t0$  é de grande importância no ciclo hidrológico, sendo na maioria dos casos considerada a maior fonte de perda de água da bacia (Tabelas 17 e 18). Os valores de  $E_t0$  foram os mesmos dentro da bacia sem considerar variações causadas pela face de exposição do terreno, pela altitude, pela temperatura (Dye, 2013).

O método pode ser incrementado ao se fornecer dados de evapotranspiração em uma resolução espacial maior que retrate melhor as variações nos valores de  $E_t0$  dentro de cada microbacia hidrográfica. Ademais, outras variáveis como infiltração, escoamento são dependentes do relevo, posição, tipo de cultura, tipo de solo, e influenciam sobremaneira o rendimento hídrico e a conservação dos solos, devendo assim, ter melhor representatividade dentro da microbacia.

### **Variável PS**

As áreas com floresta contêm a erosão e os deslizamentos de terra. As florestas devem ser posicionadas em locais de maior inclinação do terreno que diminui a velocidade de escoamento e, conseqüentemente, o potencial de erosão hídrica.

Neste trabalho, a aplicação das restrições de classe de uso da terra foi eficiente na proteção contra a erosão pois limitou a utilização de áreas mais declivosas (classe 3) por coberturas florestais (mata nativa e eucalipto). A eficiência em conter a erosão foi principalmente reflexo dos baixos valores do fator C (utilizado na equação USLE), quando comparado aos demais usos (Tabela 8).

Além da restrição espacial imposta pelas classes de uso, a eficiência da contenção de erosão proposta pode ser atingida quando se aumenta o peso na variável PS, o que representaria o interesse particular do tomador de decisão.

A MbAL, com a ocupação de cerca de 20% de vegetação nativa e 60% de áreas com inclinação, foi a que apresentou maior perda de solo. Neste caso, a ação conjunta da restrição de classes e do maior peso atribuído à variável PS levou à uma grande redução na PS.

As demais microbacias também apresentaram redução da perda de solo após processo de otimização porém, seus valores não eram tão altos quanto na MbAL. A MbSL, mesmo com 60% de sua área na classe 3 de restrição (Tabela 5), não apresentou grandes perdas de solo, devido à grande área com ocupação de vegetação nativa (cerca de 80%). Já MbSM e MbLI, apresentaram baixos valores devido ao relevo predominantemente plano (Tabela 7).

As MbSM e MbLI estão localizadas em áreas mais planas (Tabela 5) onde praticamente não há restrições de classe de uso da terra, tampouco problemas de erosão (as duas microbacias apresentaram baixos valores de PS). Desta forma foi possível diminuir o peso da variável PS (Tabela 16) e direcionar o foco do planejamento para a produção hídrica.

O método aqui proposto foi capaz de representar bem o efeito da variação do relevo na perda de solo. O fato de direcionar o foco da otimização para a diminuição de perdas de solo resultou em maior ocupação por vegetação nativa em áreas mais íngremes (Tabela 19). Isto expressa a eficiência das florestas em reduzir a perda de solo, sobretudo quando analisada em conjunto com a otimização e sua efetividade deste uso em prover este serviço ambiental.

Houve redução de PS à níveis abaixo do tolerado para o tipo de solo (valores apresentados por Bertoni e Lombardi Neto (2005), Oliveira et al. (2008) e Lima et al. (2016)) em condições específicas) em todas as microbacias. Nessas áreas a proposta de manejo foi eficiente em manter estável a taxa de degradação com a de formação do solo. Porém, é importante frisar que este benefício é diminuído quando são excluídas as restrições de uso da terra, que ressalta na importância da classificação da capacidade de uso dos solos (valores de PS apresentado nas Figuras 9 e 15 aumentam com a retirada da restrição das classes de uso, especificamente nas MbAL e MbSM).

### **Rentabilidade da floresta**

O aumento da renda gerada nas microbacias, de maneira geral, compromete os fatores ambientais, ou seja, há sempre a diminuição da produção de excedente hídrico e o aumento da perda de solo (Figuras 7, 11, 14 e 17). Observa-se uma diminuição das áreas ocupadas por vegetação nativa, haja visto que é o uso que apresenta menor renda bruta dentre os usos considerados neste trabalho (Tabela 15).

Ao analisar a influência da renda fornecida pela mata nativa é possível avaliar que em todos os cenários há necessidade de aumentar significativamente sua renda (mais que 10 vezes) para que seja percebido alguma mudança nas áreas ocupadas pela mata nativa (Figuras 10, 13, 16 e 19). Nestes casos, há um grande aumento da RE em todas as bacias e diminuição nos valores de perda de solo. Além de uma tendência à diminuição do EXC nas MbSM e MbLI e de aumento nas MbAL e MbSL (muito embora sejam observações sutis).

No caso específico das MbAL e MbSL, à medida que ocorre aumento da renda de áreas com vegetação nativa (a partir do escalar 10 das Figuras 10 e 13) ocorre uma tendência de aumento do EXC. Esse aumento é reflexo do aumento de áreas de mata em locais antes ocupados por eucalipto. A renda da mata passa a influenciar mais o processo de otimização a partir do fator de multiplicação 10. Como essas duas microbacias

apresentam grande parte de sua área na classe 3, só existem duas opções de uso do solo, mata nativa e eucalipto.

As MbSM e MbLI são predominantemente planas, assim não há restrição de uso do solo e a tendência de diminuição do EXC é explicada pela substituição de áreas de pastagem (maior EXC) por áreas de vegetação nativa (Figuras 16 e 19), devido ao aumento do valor da renda bruta das matas que o aproxima dos demais usos.

O fato de ter que aumentar consideravelmente os valores de PSA (mais de 10 vezes) não implica em dizer que deve haver um aumento direto desses valores, mas que o incremento da renda bruta das microbacias deveria ser associado à outras formas de renda em conjunto com a conservação da mata nativa.

O desenvolvimento de técnicas de restauração tem avançado com propostas de manejo sustentável capaz de gerar renda extra a propriedade, seja por produtos madeireiro ou não-madeireiro. Ademais, seria possível, por meio de políticas públicas o incentivo ao agroturismo como fonte alternativa de renda para as propriedades rurais onde são valorizadas as regiões com abundância de cobertura vegetal nativa, atividades agroecológicas e de recursos hídricos.

Uma alternativa poderia ser agregar o valor de créditos de carbono à renda gerada pela mata nativa de acordo com o proposto no acordo de Paris (UNFCCC, 2015), do qual o Brasil é signatário. O PSA teria uma agregação de valores (não só com origem direta do Estado), mas de acordos internacionais já estabelecidos como REDD+ (Börner *et al.*, 2010). A criação de áreas de conservação também agregam valores à renda gerada por áreas verdes (Vincent *et al.*, 2014).

Além de agregar valor à conservação, é necessário quantificar e considerar os custos econômicos causados pelas externalidades negativas na microbacia, devido à degradação da bacia, e seus efeitos na economia das cidades. Desta forma, se possibilita a obtenção mais realista da renda originada de usos do solo mais degradantes.

Os processos erosivos causam aumento dos custos do tratamento de água para o abastecimento, da geração de energia e de demais custos por perdas de nutrientes. Fernandes *et al.* (2014) analisando duas microbacias, uma como domínio de áreas com Mata Atlântica (61,6% da área) e outra com domínio de pastagem (51% da área), calculou a perda de solo, gerada pela erosão hídrica, por meio da equação da USLE. O custo da erosão foi baseado no custo do tratamento da água pela estação de abastecimento. A

microbacia com maior área de pastagem apresentou praticamente o dobro do custo do tratamento quando comparado à microbacia com predomínio de Mata Atlântica.

Ao se avaliar as perdas e os custos relacionados à erosão hídrica (considerada uma das principais formas de degradação), Dechen et al. (2015) observaram que a ausência de cobertura do solo, quando comparada à uma cobertura de 90% do solo, causou uma diminuição de cerca de 50% a perda de água e de solo. No caso de solo, o custo da perda associado à perda dos nutrientes foi 17% da perda ocorrido na ausência de cobertura.

O sistema convencional de cultivo, que geralmente é empregado na região, apresenta maiores perdas de solo, de água (em menor quantidade) e maiores custos (causado pela erosão hídrica), quando comparado com cultivo mínimo e plantio direto (Bertol *et al.*, 2007).

Além do incremento da renda, pode-se observar que a aplicação do método aqui proposto gera uma paisagem mais diversa e equilibrada em termos de uso do solo nas MbAL, MbSM e MbLI ( os gráficos de porcentagem de área nas Figuras 9, 15 e 18). Não há o domínio de um único uso, o que evidencia a contribuição de cada uso nas variáveis utilizadas, consideradas como benefícios ao ambiente e como uma forma de segurança às comunidades.

A composição diversa de uma paisagem, o aumento da distribuição equilibrada dos fragmentos, a redução da conectividade entre os fragmentos e aumento da agregação dos mesmo favorecem a redução dos processos erosivos nas bacias (Zhang et al., 2017).

### **Minimizando a fragmentação**

Neste trabalho foram aplicadas estratégias para evitar o processo de fragmentação da paisagem, uma vez que tal processo é prejudicial ao fornecimento de serviços ambientais como diversidade espécies de espécies e recursos hídricos (Metzger, 1997; Myers et al., 2000; Zhang et al., 2017). Estas estratégias foram aplicadas durante o processo de otimização, em sequência, na fase do cruzamento e mutação.

Evitou-se fazer o cruzamento de indivíduos que apresentassem áreas contínuas próximas ao ponto de corte, além de ser adotada a mutação do conjunto dos genes (conforme descrito no item 4.1.2). Em ambas as etapas é possível fazer um ajuste do método de maneira que melhores desempenhos possam ser alcançados (Schwaab *et al.*, 2017).

Como análise prévia, foram simuladas mudanças no número de vizinhos a serem considerados e também na porcentagem da mutação. Foi verificado (dados não apresentados neste texto) que quando se restringia mais a possibilidade de mudança (visando diminuir a fragmentação) maior era a demanda de tempo computacional, o que inviabilizaria o desenvolvimento deste trabalho em tempo hábil. Destarte, cabe ao usuário definir as condições que melhor se adéquam ao problema de estudo.

### **Possibilidades de restrições**

Diante das implicações legais determinadas pelo código florestal (BRASIL, 2012), existem áreas no interior da propriedade rural onde é obrigatória a cobertura de vegetação nativa. Essas áreas são as de APP e RL (área de preservação permanente e reserva legal, respectivamente) cuja cobertura devem ser mantidas. O método proposto permite a configuração por parte do usuário para que estas áreas permaneçam sem mudança, fornecendo uma arquivo do tipo matricial, conforme apresentado no item 4.1.2.2.

Outros tipos de restrições espaciais podem ser sugeridas, como evitar que áreas de cafezais já estabelecidos possam sofrer alteração, se esta for a intenção do planejador. Áreas destinadas a produção de alimentos dentro da microbacia, visando respeitar a demanda populacional por produção de alimentos, podem ser restringidas. Ao mesmo tempo, pode-se avaliar qual seria o impacto da mudança de áreas, como floresta, para pastagem e agricultura, comumente observado no Brasil (BRASIL, 2016).

Há uma lacuna quanto ao conhecimento sobre a área mínima de vegetação nativa ou cobertura florestal necessária para manter os serviços ecossistêmicos (Tarigan *et al.*, 2018), como os serviços abordados neste trabalho (água, solo e renda).

Essas questões podem ser abordadas por meio desta metodologia, uma vez que há a possibilidade de estabelecer intervalos de interesse para cada variável e verificar o resultado do uso do solo para a área de estudo em questão. Em determinada bacia pode ser estipulado um valor mínimo de EXC a ser atingido e verificado qual seria a melhor configuração da área quanto ao uso do solo e avaliado o impacto desta restrição nas demais variáveis (solo e renda).

Poderia se determinar um limite máximo da redução do excedente hídrico, de maneira a manter a demanda hídrica da sociedade e verificar os efeitos sobre as demais variáveis ou a implementação de outras variáveis ambientais.

## 6. CONCLUSÕES

O método proposto atendeu os objetivos do trabalho para aplicação no planejamento ambiental de microbacias hidrográficas, sendo este, adaptável à necessidade dos usuários e dos responsáveis pelo planejamento ambiental.

As microbacias devem apresentar planejamentos específicos (quanto ao uso do solo) de acordo com suas características físicas as quais devem ser consideradas para melhor atender à demanda dos usuários da região.

Há uma necessidade de melhor representatividade das áreas de estudo por meio da obtenção de dados locais mais detalhados (como temperatura, precipitação e econômicos), assim como de aprimoramento do processo de otimização adicionando novas ferramentas e restrições ao mesmo.

## 7. REFERÊNCIAS

- ACHILLAS, C. *et al.* The use of multi-criteria decision analysis to tackle waste management problems: A literature review. **Waste Management and Research**, v. 31, n. 2, p. 115–129, 2013.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Manual operativo do Programa Produtor de Água**. 2º Edição, Brasília: [s.n.].
- AKINCI, H.; ÖZALP, A. Y.; TURGUT, B. Agricultural land use suitability analysis using GIS and AHP technique. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 97, p. 71–82, 2013.
- AL-YAHYAI, S. *et al.* Wind farm land suitability indexing using multi-criteria analysis. **Renewable Energy**, v. 44, p. 80–87, 2012.
- ALLEN, R. G. *et al.* **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**FAO. Rome: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/010/ah810e/AH810E00.htm>>.
- ALMEIDA, A. C. DE; SOARES, J. V. Comparação entre uso de água em plantações de *Eucalyptus grandis* e floresta ombrófila densa (Mata Atlântica) na costa leste do Brasil. **Revista Árvore**, v. 27, n. 2, p. 159–170, 2003.
- ALMEIDA, R. A. **Índice para caracterizar a adequação da ocupação do solo à sua capacidade de uso**. [s.l.] Universidade Federal de Viçosa, 2014.
- ALONSO, J. A.; LAMATA, M. T. Consistency in the analytic hierarchy process: a new approach. **International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems**, v. 14, n. 4, p. 445–459, 2006.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ALVES, M. E. B. **Disponibilidade e demanda hídrica na produtividade da cultura do eucalipto**. [s.l.] Universidade Federal de Viçosa, 2009.
- AMATYA, D. M.; SKAGGS, R. W.; TRETTIN, C. C. Advancing the science of forest hydrology. **Resource: Engineering and Technology for Sustainable World**, v. 16, n. 5, 2009.
- AMORIM, R. S. S. *et al.* Avaliação do desempenho dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para diferentes condições edafoclimáticas do Brasil. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 6, p. 1046–1049, 2010.

ANACHE, J. A. A. *et al.* Land use and climate change impacts on runoff and soil erosion at the hillslope scale in the Brazilian Cerrado. **Science of the Total Environment**, v. 622–623, p. 140–151, 2018.

ANDRADE, D. C.; ROMEIRO, A. R. **Serviços ecossistêmicos e sua importância para o sistema econômico e o bem-estar humano** Texto para Discussão. Campinas: [s.n.].

ARABI, M.; GOVINDARAJU, R. S.; HANTUSH, M. M. Cost-effective allocation of watershed management practices using a genetic algorithm. **Water Resources Research**, v. 42, n. 10, p. 1–14, 2006.

AUDEH, S. J. S. **Capacidade de Uso das Terras: analogias e contradições entre o conhecimento acadêmico e o não acadêmico em áreas de agricultura familiar de base ecológica.** [s.l.] Universidade Federal de Pelotas, 2013.

BERTOL, I. *et al.* ASPECTOS FINANCEIROS RELACIONADOS ÀS PERDAS DE NUTRIENTES POR EROÇÃO HÍDRICA EM DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 31, n. 1, p. 133–142, 2007.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo.** 5. ed. São Paulo: Ícone editora, 2005.

BOERS, N. *et al.* A deforestation-induced tipping point for the South American monsoon system. **Scientific Reports**, v. 7, n. December 2016, p. 1–9, 2017.

BÖRNER, J. *et al.* Direct conservation payments in the Brazilian Amazon: Scope and equity implications. **Ecological Economics**, v. 69, n. 6, p. 1272–1282, 2010.

BRASIL. **Decreto Nº 94.076, de 5 de março de 1987. Institui o Programa Nacional de Microbacias Hidrográficas e dá outras providências.** Diário Oficial da União - Seção 1 - 6/3/1987, Página 3159, , 1987.

\_\_\_\_. Lei Nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei** , p. 14, 1997.

\_\_\_\_. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. **Diário Oficial da União**, p. 1–32, 2012.

\_\_\_\_. **Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.** Brasília: [s.n.].

CAO, K. *et al.* Sustainable land use optimization using Boundary-based Fast Genetic Algorithm. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 36, n. 3, p. 257–269, 2012.

CECÍLIO, R. A. *et al.* Aplicação dos modelos RUSLE e WEPP para a estimativa da erosão hídrica em microbacia hidrográfica de Viçosa (MG). **Revista Verde**, v. 4, n. 2, p. 39–45, 2009.

\_\_\_\_. **NetErosividade ES: software para a estimativa da erosividade da chuva no Espírito Santo.** Simposio de Pós-Graduação em Ciências Florestais. **Anais...** Rio de Janeiro: 2010

CHAVES, H. M. L. Incertezas na Predição da Erosão com a Usle: Impactos e Mitigação. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 34, n. 6, p. 2021–2029, 2010a.

\_\_\_\_. Relações de aporte de sedimento e implicações de sua utilização no pagamento por serviço ambiental em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 34, n. 4, p. 1469–1477, 2010b.

CHRISTINA, M. *et al.* Importance of deep water uptake in tropical eucalypt forest. **Functional Ecology**, v. 31, n. 2, p. 509–519, 2017.

CIBIN, R.; CHAUBEY, I. A computationally efficient approach for watershed scale spatial optimization. **Environmental Modelling & Software**, v. 66, p. 1–11, 2015.

COSTANZA, R. *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature**, v. 387, n. 6630, p. 253–260, 1997.

DEAN, J. F. *et al.* A groundwater recharge perspective on locating tree plantations within low-rainfall catchments to limit water resource losses. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 2, p. 1107–1123, 2015.

DECHEN, S. C. F. *et al.* Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. **Bragantia**, v. 74, n. 2, p. 224–233, 2015.

DEMARCHI, J. C. **Geotecnologias aplicadas à estimativa de perdas de solo por erosão hídrica na sub-bacia do Ribeirão das Perobas, Município de Santa Cruz do rio Pardo - SP.** [s.l.] Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2012.

DENARDIN, J. E. **Erodibilidade do solo estimada por meio de parametros físicos e químicos.** [s.l.] Universidade de São Paulo, 1990.

DIAS-FILHO, M. B. **Diagnóstico das Pastagens no Brasil.** Belém: [s.n.].

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas.** Campina Grande: [s.n.].

DOTEN, C. O. *et al.* A spatially distributed model for the dynamic prediction of sediment erosion and transport in mountainous forested watersheds. **Water Resources Research**, v. 42, n. 4, p. 1–15, 2006.

DYE, P. A review of changing perspectives on Eucalyptus water-use in South Africa. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 51–57, 2013.

ENGEL, S.; PAGIOLA, S.; WUNDER, S. Designing payments for environmental services in theory and practice: An overview of the issues. **Ecological Economics**, v. 65, n. 4, p. 663–674, 2008.

ESPÍRITO SANTO. **Decreto nº 4189-R de N° 4189-R de 20 de dezembro de 2017.**, 2017.

FAHRIG, L. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 34, n. 1, p. 487–515, nov. 2003.

FAO AND ITPS. **Status of the World's Soil Resources (SWSR) - Main Report**. Rome: [s.n.].

FERNANDES, M. M. *et al.* Valoração ambiental do efeito externo da erosão em duas sub-bacias com diferentes percentuais de mata atlântica. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 2, p. 411–420, 2014.

FILOSO, S. *et al.* Impacts of forest restoration on water yield: A systematic review. **Plos One**, v. 12, n. 8, p. 26, 2017.

FOLEY, J. A. *et al.* Global consequences of land use. **Science (New York, N.Y.)**, v. 309, n. 5734, p. 570–574, 22 jul. 2005.

FUJIEDA, M. *et al.* Hydrological processes at two subtropical forest catchments: the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. **Journal of Hydrology, Amsterdam**, v. 196, n. 1–4, p. 26–46, 1997.

FUJIHARA, A. K. **Predição de erosão e capacidade de uso do solo numa microbacia do oeste paulista com suporte de geoprocessamento**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2002.

GADDIS, E. J. B. *et al.* Spatial Optimization of Best Management Practices to Attain Water Quality Targets. **Water Resources Management**, v. 28, n. 6, p. 1485–1499, 20 mar. 2014.

GALATTI FILHO, F. A. **Geoprocessamento aplicado na distribuição espacial da capacidade de uso na microbacia do Córrego dos Rochas, Avaré (SP)**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2006.

GALEANO, E. A. V. *et al.* **Síntese da produção agropecuária do Espírito Santo 2014/2015**. Vitória: [s.n.].

GRASS DEVELOPMENT TEAM. **Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software** Open Source Geospatial Foundation, , 2016.

GUSWA, A. *et al.* Ecosystem services: Challenges and opportunities for hydrologic modeling to support decision making. **Water Resources Research**, p. 1–10, 2014.

HOLZKÄMPER, A.; LAUSCH, A.; SEPPELT, R. Optimizing landscape configuration to enhance habitat suitability for species with contrasting habitat requirements. **Ecological Modelling**, v. 198, n. 3–4, p. 277–292, 2006.

HOUGHTON, R. A. *et al.* Carbon emissions from land use and land-cover change. **Biogeosciences**, v. 9, n. 12, p. 5125–5142, 13 dez. 2012.

ILSTEDT, U. *et al.* Intermediate tree cover can maximize groundwater recharge in the seasonally dry tropics. **Scientific Reports**, v. 6, n. February 2015, p. 1–12, 2016.

INDUSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Ibá 2015**. [s.l: s.n.].

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. v. 79, p. 9–16, 2000.

KAIM, A.; CORD, A. F.; VOLK, M. A review of multi-criteria optimization techniques for agricultural land use allocation. **Environmental Modelling and Software**, v. 105, n. July, p. 79–93, 2018.

KOH, L. P.; LEE, T. M. Sensible consumerism for environmental sustainability. **Biological Conservation**, v. 151, n. 1, p. 3–6, 2012.

LAUTENBACH, S. *et al.* Optimization-based trade-off analysis of biodiesel crop production for managing an agricultural catchment. **Environmental Modelling and Software**, v. 48, p. 98–112, 2013a.

\_\_\_\_. Optimization-based trade-off analysis of biodiesel crop production for managing an agricultural catchment. **Environmental Modelling & Software**, v. 48, p. 98–112, out. 2013b.

LEH, M. D. K. K. *et al.* Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 165, p. 6–18, jan. 2013.

LEPSCH, I. F. *et al.* **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso**. Campinas (SP): Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1983.

LI, Q. *et al.* The cumulative effects of forest disturbance and climate variability on baseflow in a large watershed in British Columbia, Canada. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 291, n. June, p. 1–45, 2016.

\_\_\_\_. The cumulative effects of forest disturbance and climate variability on streamflow components in a large forest-dominated watershed. **Journal of Hydrology**, v. 557, n. January 2018, p. 448–459, 2018.

LIMA, C. G. DA R. *et al.* Influência de atributos químicos na erodibilidade e tolerância de perda de solo na bacia hidrográfica do baixo São José dos Dourados. **Geociências**, v. 35, n. 1, p. 63–76, 2016.

LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos Uma importante ferramenta da Inteligência Computacional**. 2ª Edição ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2008.

MANFREDINI, F. B.; GUANDIQUE, M. E. G.; MORAIS, L. C. Análise do Programa “Produtor de Águas”: no contexto dos projetos de Pagamentos por Serviços Ambientais (PSA) implementados no Brasil. **Revista Iberoamericana de Economía Ecológica**, v. 23, p. 47–62, 2014.

- MARQUES, J. Q. DE A. **Manual Brasileiro para a Capacidade de Uso da Terra**. 3<sup>o</sup> Aproxim ed. Rio de Janeiro: Escritório Técnico de Agricultura Brasil-Estados Unidos, 1971.
- MATTHEWS, K. B.; SIBBALD, A. R.; CRAW, S. Implementation of a spatial decision support system for rural land use planning: integrating geographic information system and environmental models with search and optimisation algorithms. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 23, p. 9–26, 1999.
- MEMMAH, M. M. *et al.* Metaheuristics for agricultural land use optimization. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 35, n. 3, p. 975–998, 2015.
- METZGER, J. P. Relationships between landscape structure and tree species diversity in tropical forests of South-East Brazil. **Landscape and Urban Planning**, v. 37, n. 1–2, p. 29–35, jun. 1997.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and Human Well-being: Synthesis**. Island Press. Washington, DC: Island Press, 2005. Disponível em: <<http://www.who.int/entity/globalchange/ecosystems/ecosys.pdf>>. Acesso em: 25 set. 2013.
- MÜNIER, B.; BIRR-PEDERSEN, K.; SCHOU, J. S. Combined ecological and economic modelling in agricultural land use scenarios. **Ecological Modelling**, v. 174, n. 1–2, p. 5–18, 2004.
- MYERS, N. *et al.* Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, n. 6772, p. 853–8, 24 mar. 2000.
- OLIVEIRA, A. H. **Erosão hídrica e seus componentes na sub-bacia hidrográfica do horto florestal Terra Dura, Eldorado Do Sul (Rs)**. [s.l.] UFLA, 2011.
- OLIVEIRA, F. P. DE *et al.* Tolerância de Perda de Solo por Erosão para o Estado da Paraíba. **Revista de biologia e ciências da terra**, v. 8, n. 2, p. 60–71, 2008.
- OLIVEIRA, L. T. **Aplicação do modelo SWAT para simular vazões em uma bacia hidrográfica em Aracruz, ES**. [s.l.] Universidade Federal do Espírito Santo, 2014.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Livraria e Editora Agropecuária Ltda, 2002a.
- \_\_\_\_\_. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. [s.l.] Livraria e Editora Agropecuária Ltda, 2002b.
- PIMENTEL, D. *et al.* Food versus biofuels: Environmental and economic costs. **Human Ecology**, v. 37, n. 1, p. 1–12, 2009.
- PINTO, N. L. DE S. *et al.* **Hidrologia Básica**. 10. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2007.
- PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. DOS S.; SILVA, D. D. **Escoamento Superficial**. 2<sup>o</sup> ed. Viçosa: Editora UFV, 2014.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing** Vienna, Austria R Foundation for Statistical Computing, , 2018. Disponível em: <<https://www.r-project.org>>

RESENDE, M. *et al.* **Pedologia: base para distição de ambientes**. 6° ed. Lavras: Editora UFLA, 2014.

RIO GRANDE DO SUL. **Manual de Conservação de Solo e Água**. Porto Alegre, RS: Estado do Rio Grande do Sul. Secretaria da Agricultura., 1983.

ROTHMAN, D. W.; MAYS, L. W. Water Resources Sustainability: Development of a Multi-objective Optimization Model. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 140, n. 2, p. 9, 2013.

SAATY L., T. A scaling method for priorities in hierarchal structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 15, p. 234–281, 1977.

SANTÉ-RIVEIRA, I.; CRECENTE-MASEDA, R.; MIRANDA-BARRÓS, D. GIS-based planning support system for rural land-use allocation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 63, n. 2, p. 257–273, 2008.

SANTOS, G. DE A.; CAMARGO, F. A. DE O. **Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo - Ecossistemas Tropicais e Subtropicais**. 1. ed. Porto alegre: Genesis, 1999.

SARTORI, A. **Avaliação da Classificação Hidrológica do Solo para a Determinação do Excesso de Chuva do Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos**. [s.l: s.n.].

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 05-18, 2005.

SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; KLAMT, E. **Classificação da Aptidão Agrícola das terras: um sistema alternativo**. Guaíba: Agrolivros, 2007.

SCHWAAB, J. *et al.* Improving the performance of genetic algorithms for land-use allocation problems. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 00, n. 00, p. 1–24, 2017.

SEFAZ-ES. **Secretaria de Estado da Fazenda do Espírito Santo**. Disponível em: <[http://internet.sefaz.es.gov.br/informacao/indices\\_vrte.php](http://internet.sefaz.es.gov.br/informacao/indices_vrte.php)>. Acesso em: 13 mar. 2018.

SILVA, A. M. DA *et al.* Erosividade da chuva e erodibilidade de cambissolo e latossolo na região de Lavras, sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1811–1820, 2009.

SILVA, F. D. G. B. DA *et al.* Previsão da perda de solo na Fazenda Canchim - SP (EMBRAPA) utilizando geoprocessamento e o USLE 2D. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 141–148, 2010.

SILVA, W. G. *et al.* Susceptibilidade a erosão utilizando o processo de análise hierárquica (AHP) e sistema de informação geográfica. **Cerrado Agrociências**, n. 7, p. 66–78, 2016.

SIRIMARCO, X. *et al.* Water regulation by grasslands: A global meta-analysis. **Ecohydrology**, n. November 2017, p. 1–9, 2018.

SOIL CONSERVATION SERVICE. **National engineering handbook**. [s.l: s.n.].

SOKOUTI, R.; NIKKAMI, D. Optimizing land use pattern to reduce soil erosion. **Eurasian Journal of Soil Science (Ejss)**, v. 6, n. 1, p. 75–75, 2017.

STAHL, C. *et al.* Depth of soil water uptake by tropical rainforest trees during dry periods: Does tree dimension matter? **Oecologia**, v. 173, n. 4, p. 1191–1201, 2013.

STEWART, T. J.; JANSSEN, R.; HERWIJNEN, M. VAN. A genetic algorithm approach to multiobjective land use planning. **Computers and Operations Research**, v. 31, n. 14, p. 2293–2313, 2004.

TAMBOSI, L. R. *et al.* Funções eco-hidrológicas das florestas nativas e o Código Florestal. **Estudos Avançados**, v. 29, n. 84, p. 151–162, 2015.

TARIGAN, S. *et al.* Minimum forest cover required for sustainable water flow regulation of a watershed: A case study in Jambi Province, Indonesia. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, n. 1, p. 581–594, 2018.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. **Publications in Climatology**. New Jersey: Drexel Inst. of Technology, 1955.

TREVISAN, R. *et al.* Dinâmica da Água em uma Microbacia com Cobertura Florestal de Eucalipto Localizada na Serra do Mar no Vale do Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 4, p. 207–216, 2012.

TSCHARNTKE, T. *et al.* Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification. **Biological Conservation**, v. 151, n. 1, p. 53–59, 2012.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2005.

\_\_\_\_\_. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto alegre: UFRGS/ABRH, 2015.

UNFCCC. **Paris agreement**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[https://unfccc.int/sites/default/files/english\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf)>.

VANCLAY, J. K. Managing water use from forest plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 257, n. 2, p. 385–389, 2009.

VINCENT, J. R. *et al.* Tropical countries may be willing to pay more to protect their forests. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 28, p. 10113–10118, 2014.

WILLIAMS, K. J. *et al.* Optimised whole-landscape ecological metrics for effective delivery of connectivity-focused conservation incentive payments. **Ecological Economics**, v. 81, p. 48–59, set. 2012.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Rainfall energy and its relation to soil loss. **Transactions of the American Geophysical Union**, n. 39, p. 285–291, 1958.

\_\_\_\_. Predicting rainfall erosion losses. **Agriculture handbook**, n. 537, p. 285–291, 1978.

WU, Y. *et al.* Projecting the land cover change and its environmental impacts in the Cedar River Basin in the Midwestern United States. **Environmental Research Letters**, v. 8, n. 2, p. 024025, 1 jun. 2013.

WUNDER, S. Revisiting the concept of payments for environmental services. **Ecological Economics**, v. 117, p. 234–243, 2015.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v. 2659, n. October 2015, p. 2644–2659, 2015.

YUAN, L. *et al.* Soil Erosion Assessment of the Poyang Lake Basin, China: Using USLE, GIS and Remote Sensing. **Journal of Remote Sensing & GIS**, v. 5, n. 3, 2016.

ZHANG, S. *et al.* The influence of changes in land use and landscape patterns on soil erosion in a watershed. **Science of the Total Environment**, v. 574, p. 34–45, 2017.

ZOLEKAR, R. B.; BHAGAT, V. S. Multi-criteria land suitability analysis for agriculture in hilly zone: Remote sensing and GIS approach. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 118, p. 300–321, 2015.