

LUCAS ARTHUR DE ALMEIDA TELLES

**OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA E FLORESTAL EM
PROPRIEDADES RURAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

T274o
2018
Telles, Lucas Arthur de Almeida, 1991-
Otimização da produção agrícola e florestal em
propriedades rurais / Lucas Arthur de Almeida Telles. – Viçosa,
MG, 2018.
v, 37 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Márcio Lopes da Silva.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 35-37.

1. Economia florestal. 2. Programação (Matemática).
3. Sistemas de informação geográfica. I. Universidade Federal
de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa de
Pós-Graduação em Ciência Florestal. II. Título.

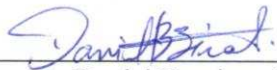
CDO adapt CDD 22. ed. 634.96

LUCAS ARTHUR DE ALMEIDA TELLES

**OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA E FLORESTAL EM
PROPRIEDADES RURAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

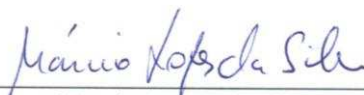
APROVADA: 29 de janeiro de 2018.



Daniel Henrique Breda Binoti



Helio Garcia Leite



Marcio Lopes da Silva
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A Deus.

A meus pais, José e Joana, pelo amor, carinho e exemplo de vida.

A minha irmã, Kamilla, pela amizade incondicional.

A minha amada Luana, pelo companheirismo, dedicação e amor.

Ao meu orientador, prof. Márcio, pela oportunidade, orientação e amizade.

A todos os amigos do laboratório SIGMA, pelas muitas risadas na hora do cafezinho.

A todos os professores do DEF.

A CAPES pela concessão da bolsa.

SUMÁRIO

RESUMO	iv
ABSTRACT	v
1. Introdução	1
2. Objetivo Geral	2
2.1. Objetivos Específicos	2
3. Material e Métodos	3
3.1. Classificação da Capacidade de Uso do Solo	3
3.2. Modelo Matemático	5
3.3. Estudo de Caso	5
3.3.1. Propriedade Modelo e Capacidade de Uso do Solo	6
3.3.2. Banco de Dados	7
3.3.3. Cenário Inicial	11
3.3.4. Definição das Prescrições e Modelo Numérico de Otimização	12
4. Resultados e Discussão	16
4.1. Modelo Matemático	16
4.2. Estudo de Caso	21
5. Conclusão	34
6. Referências	35

RESUMO

TELLES, Lucas Arthur de Almeida, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, janeiro de 2018. **Otimização da Produção Agrícola e Florestal em Propriedades Rurais.** Orientador: Marcio Lopes da Silva.

A intensa competição por mercados consumidores, a instabilidade climática e as pressões ambientais demandam que a produção agrícola e florestal se torne cada vez mais eficiente e sustentável. Neste cenário, a utilização otimizada dos recursos aliada a definição precisa das atividades é crucial. Embora já existam estudos que abordam a produção otimizada, sob diferentes cenários, ainda são escassos modelos matemáticos que conciliem capacidade de uso do solo, atividades de ciclo longo e recuperação de áreas degradadas em um contexto espacial e temporal. Portanto, o objetivo do presente estudo foi desenvolver um modelo programação matemática para maximizar o valor presente líquido de atividades florestais e agrícolas, considerando a capacidade de uso do solo das propriedades rurais. O modelo de programação inteira formulado possui restrições de saldo mínimo, rotação máxima, singularidade, nulidade, capacidade de uso do solo, produção mínima, opções de recuperação, ordenamento da recuperação e reflorestamento. Para a avaliação do mesmo, foi realizado um estudo de caso em uma propriedade rural simulada de 36 hectares. Através da aplicação do modelo, foi possível regularizar a produção na propriedade como um todo. Portanto, áreas produtivas foram utilizadas segundo sua capacidade de uso do solo enquanto áreas destinadas a conservação foram recuperadas ao longo do horizonte de planejamento. O modelo proposto pode reduzir o impacto da produção sob a propriedade, ao atender as demandas existentes, sem explorar ao máximo suas unidades produtivas. Tanto a recuperação quanto a implantação de novas atividades são financiadas pela receita das atividades em fase produtiva. Desta forma, é possível aplicar o modelo e viabilizar a recuperação de áreas degradadas em propriedades rurais independentemente da existência de políticas de pagamentos por serviços ambientais. O modelo auxilia na transição da produção e permite o gerenciamento da propriedade por produto, saldo ou ambos. Logo o modelo proposto promove a recuperação de áreas destinadas a conservação, assegura o saldo positivo nos períodos do horizonte de planejamento, permite a produção sustentável nas unidades produtivas, auxilia na transição da produção e no gerenciamento da propriedade. Contudo, a inclusão de incertezas, ao invés da adoção de cenários deterministas, pode tornar o modelo mais robusto e viabilizar sua utilização de forma mais segura e realista.

ABSTRACT

TELLES, Lucas Arthur de Almeida, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, January, 2018. **Optimization of agricultural and forestry production in rural properties.** Advisor: Marcio Lopes da Silva.

The intense competition for consumers markets, the weather instability, and the environmental pressures demand that the agricultural and forest production became more efficient and sustainable. To face this scenario, an optimized resource utilization allied to a precise activities definition is a crucial. Although, there are already researches that approach the optimized production under different scenarios, mathematic models that conciliate production with land use capacity, long-term activities and the recovery of degraded areas in a spatial context still lacking. Therefore, the aim of this research is to develop a mathematical programming model to maximize the net present value of the agricultural and forest activities, considering the land use capacity of the rural properties. The proposed integer programming model has constraints of minimum profit, maximum rotation, unicity, nullity, land use capacity, minimum production, recovery type, recovery order and reforestation. The model evaluation was done through a study case, in what a 36 hectares property was simulated. Through the model application, it was possible to regularize production on the entire property. Therefore, productive areas were utilized according to their land use capacity while the ones destined to conservation were recovered throughout the planning horizon. The proposed model can reduce the production impact over the property, meeting the existing demands, without maximum exploration of the productive areas. Both, recovery and implementation of new activities, area funded by revenues of activities in productive phases. Therefore, it is possible to apply the model and enable the recovery of degraded areas in rural properties regardless the existence of payment policies for environmental services. The model also helps on the production shift and allows managing the property by product demands, profit or both. In conclusion, the proposed model promotes the recovery of areas destined to conservation, assures the profit in every period of the planning horizon, allows the sustainable production on the productive areas, helps the production shift and in the efficient property management. However, the inclusion of uncertainty, instead the adoption of a deterministic scenario, can improve the model in order to enable its utilization in a more safety and realistic way.

1. Introdução

A intensa competição por mercados consumidores, a instabilidade climática e as pressões ambientais demandam que a produção agrícola e florestal se torne cada vez mais eficiente e sustentável. Neste cenário, a utilização otimizada dos recursos aliada a definição precisa das atividades é crucial.

A gestão de empreendimentos agrícolas e florestais, a fim de assegurar sua produção e lucratividade, está intimamente relacionada a modelos de suporte a tomada de decisão (Dury *et al.*, 2012). Em problemas de planejamento da produção, estes modelos auxiliam na seleção, dimensionamento, distribuição e substituição das atividades ao longo do tempo, de forma otimizada. Como esta tarefa envolve grande quantidade de informação, alocação de recursos escassos, riscos e incertezas, ela ainda representa um desafio (Filippi *et al.*, 2017).

Diversas estratégias de otimização têm sido aplicadas no planejamento de empreendimentos agrícolas e florestais (Alfandari *et al.*, 2015; Cid-Garcia *et al.*, 2014; Seyedmohammadi *et al.*, 2018; You & Hsieh, 2017; Zhang *et al.*, 2017). Por exemplo, métodos heurísticos tem se mostrado ferramentas eficientes de otimização pois podem resolver problemas complexos em menor tempo computacional e incluir objetivos contrastantes de forma simultânea (Arunkumar & Jothiprakash, 2017; Sarker & Ray, 2009). Contudo, os mesmos não garantem soluções ótimas globais como os modelos de programação matemática. Além disso, a distribuição espaço-temporal de atividades, uma das características importantes para o aperfeiçoamento do planejamento segundo Dury *et al.* (2013), pode ser facilmente incluída na formulação deste último tipo de modelo.

O planejamento da produção, por sua vez, tem sido avaliado sob diferentes realidades. Existem trabalhos que otimizam a produção de propriedades rurais considerando manejo de água (Liu *et al.*, 2017; Niu *et al.*, 2016; López-Mata *et al.*, 2016; Osama *et al.* 2017), manejo de solo, restrições políticas (Galán-Martín *et al.*, 2015), restrições de mão de obra e de uso de pesticidas. Dury *et al.* (2012) e Kusumastuti *et al.* (2016), apresentam revisões sobre a concepção e modelagem de problemas relacionados ao planejamento da produção, enfatizando a necessidade de modelos robustos frente a complexidade desta classe de problemas.

Embora o planejamento de propriedades rurais seja amplamente explorado, ainda são escassos modelos que considerem a adequabilidade das prescrições a capacidade produtiva da propriedade (Cid-Garcia *et al.*, 2014). Além disso, são encontrados poucos estudos que incluam flexibilidade na rotação das culturas, combinando atividades de ciclo

curto e longo (Stein & Steinmann, 2018). A recuperação de áreas destinadas a conservação, apesar de ser uma necessidade recorrente, também é dificilmente abordada.

Neste sentido, o planejamento da produção é uma atividade complexa e demanda a utilização de robustos modelos de programação. O aporte de outras áreas do conhecimento, como sistema de informação geográfica e solos, pode viabilizar a caracterização da capacidade de uso do solo da propriedade, identificando espacialmente as unidades produtivas adequadas a cada cultura. Desta forma, é possível definir planejamentos voltados a maximização do lucro e garantir a utilização sustentável da propriedade.

2. Objetivo Geral

Desenvolver um modelo de programação matemática para maximizar o valor presente líquido de atividades florestais e agrícolas considerando a capacidade de uso do solo das unidades produtivas de propriedades rurais.

2.1. Objetivos Específicos

- Modelar as prescrições de forma que as mesmas sejam capazes de representar implantação, manutenção e substituição de atividades em diferentes rotações.
- Incluir a recuperação de áreas destinadas a conservação na modelagem.
- Demonstrar a utilidade do modelo durante a transição da produção.
- Tornar a propriedade economicamente viável em todos os períodos do horizonte de planejamento.
- Integrar o Sistema de Informação Geográfica, SIG, nas análises e resultados.

3. Material e Métodos

3.1. Classificação da Capacidade de Uso do Solo

Para a formulação do modelo de otimização foi adotado o sistema de classificação da capacidade de uso do solo proposto por Rio Grande do Sul (1983). Esse sistema adota oito classes que são relacionadas a sua capacidade de uso.

- Classe I: Terras cultiváveis continuamente com culturas anuais sem a necessidade de adoção de práticas de conservação;
- Classe II: Terras cultiváveis continuamente com culturas anuais desde que sejam adotadas práticas simples de conservação;
- Classe III: Terras cultiváveis continuamente com culturas anuais desde que sejam adotadas práticas intensivas de conservação;
- Classe IV: Terras cultiváveis ocasionalmente com culturas anuais desde que sejam adotadas práticas intensivas de conservação;
- Classe V: Terras cultiváveis continuamente com culturas permanentes sem a necessidade de adoção de práticas de conservação;
- Classe VI: Terras cultiváveis continuamente com culturas permanentes desde que sejam adotadas práticas intensivas de conservação;
- Classe VII: Terras cultiváveis ocasionalmente com culturas permanentes desde que sejam adotadas práticas intensivas de conservação;
- Classe VIII: Terras muito propensas a degradação sendo destinadas apenas a conservação;

A capacidade de uso do solo foi determinada conforme a seguinte fórmula mínima (Rio Grande do Sul, 1983):

$$\text{Capacidade de Uso do Solo} = \frac{PE - DI}{D - E} \quad (1)$$

em que:

PE = fator determinante relacionado a profundidade efetiva, cm;

DI = fator determinante relacionado a drenagem Interna;

D = fator determinante relacionado a declividade, porcentagem;

E = fator determinante relacionado a propensão a erosão;

Durante a classificação, os fatores determinantes são avaliados em campo e suas classes inferidas de acordo com o Tabela 1. A classe do fator mais limitante define, também, a capacidade de uso da unidade produtiva.

Tabela 1. Fatores determinantes e classes de capacidade de uso do solo segundo o sistema de classificação proposto por Rio Grande do Sul, 1983. PE = profundidade efetiva, DI = drenagem interna, D = declividade, E = propensão a erosão.

Fator	Caracterização	Graus de Identificação e Avaliação			Classes de Capacidade de uso								
		Descrição	Quantificação	Valor	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
PE	Espessura da camada de solo estruturado	- muito profundo	+ de 200 cm	1	x	x	x	x	x	x	x	x	
		- profundo	100 a 200 cm	2	x	x	x	x	x	x	x	x	
		- moderadamente profundo	50 a 100 cm	3		x	x	x	x	x	x	x	
		- raso	25 a 50 cm	4				x	x	x	x	x	
		- muito raso	- de 25 cm	5						x	x	x	
DI	Velocidade com que a água se infiltra e percorre o perfil do solo	- excessiva		1		x	x	x	x	x	x	x	
		- boa		2	x	x	x	x	x	x	x	x	
		- moderada		3		x	x	x	x	x	x	x	
		- pobre		4			x	x	x	x	x	x	
		- muito pobre		5					x	x	x	x	
D	Inclinação do terreno em relação a uma curva de nível	- levemente ondulado	0 a 3%	1	x	x	x	x	x	x	x	x	
		- pouco ondulado	3 a 5%	2		x	x	x		x	x	x	
		- ondulado	5 a 12%	3			x	x		x	x	x	
		- acidentado	12 a 20%	4				x		x	x	x	
		- muito acidentado	20 a 40%	5						x	x	x	
		- excessivamente acidentado	+ de 40%	6							x	x	
E	Laminar: avaliação em forma decrescente, pela espessura da camada restante do solo superficial	- não aparente	+ de 25cm	0	x	x	x	x	x	x	x	x	
		- ligeira	25 a 15 cm	1		x	x	x	x	x	x	x	
		- moderada	15 a 5 cm	2			x	x		x	x	x	
		- severa (horizonte "B" exposto)	-	3						x	x	x	
		- muito severa (horizonte "B" muito erodido)	-	4							x	x	
		- extremamente severa (afloramento do horizonte "C")	-	5								x	
		- Em voçorocas		6									x
		- Em sulcos: segundo a	- ocasionais	- de 30 sulcos	7		x	x	x		x	x	x
	- frequentes	+ de 30 sulcos	8			x	x		x	x	x		

Fator	Caracterização	Graus de Identificação e Avaliação			Classes de Capacidade de uso							
		Descrição	Quantificação	Valor	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
	frequência de aparecimento em toda área da gleba	- muito frequentes	+ de 75% da área	9				x		x	x	x
	Em sulcos: em função da profundidade e da dificuldade ao trânsito e ao trabalho das máquinas no preparo do solo	- superficiais	podem ser ultrapassados e desfeitos	10		x	x			x	x	x
		- rasos	podem ser ultrapassados / não desfeitos para preparo normal	11				x		x	x	x
		- profundos	não podem ser cruzados por máquinas	12							x	x

3.2. Modelo Matemático

O modelo proposto foi formulado como um modelo de programação inteira. O objetivo foi maximizar o valor presente líquido global do investimento, sujeito a restrições de: saldo mínimo, rotação máxima, capacidade de uso do solo, produção mínima, singularidade, nulidade e não negatividade. A fim de expandir sua utilização para propriedades com a presença de passivo ambiental, foram adicionadas restrições de opções de recuperação, ordenamento da recuperação e reflorestamento.

3.3. Estudo de Caso

A fim de exemplificar o emprego do modelo, foi proposto e resolvido o seguinte estudo de caso (Figura 1).

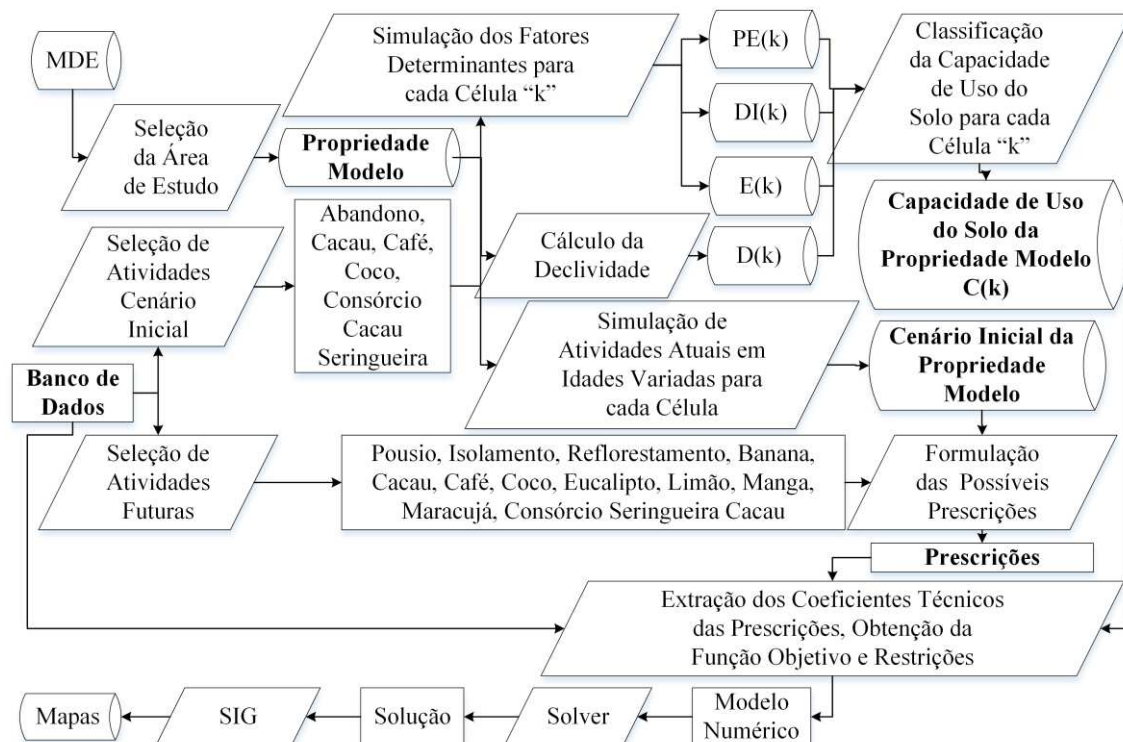


Figura 1. Fluxograma representando as etapas realizadas no estudo. MDE = modelo digital de elevação; PE(k) = profundidade efetiva da k-ésima unidade; DI(k) = drenagem interna da k-ésima unidade; E(k) = propensão a erosão da k-ésima unidade; D(k) = declividade da k-ésima unidade; C(k) = capacidade de uso do solo da k-ésima unidade;

3.3.1. Propriedade Modelo e Capacidade de Uso do Solo

Para a realização do estudo de caso, foi utilizado um modelo digital de elevação – MDE, com resolução espacial de 0,04 hectares, referente ao sudeste do estado de Minas Gerais. A propriedade modelo foi definida através da seleção de uma subárea de 900 células, 36hectares. Cada célula corresponde a uma unidade de manejo, que pode ser destinada a produção ou a conservação, conforme sua classe de capacidade de uso do solo.

Embora, neste estudo, foram consideradas unidades de manejo quadráticas e de mesma área, o modelo pode ser aplicado em propriedades onde as mesmas sejam irregulares e de diferentes tamanhos.

A próxima etapa consistiu na simulação dos seguintes fatores determinantes: profundidade efetiva, drenagem interna e propensão a erosão para cada unidade de manejo da propriedade modelo. A declividade, por sua vez, foi calculada. A partir da avaliação da capacidade de uso segundo os fatores determinantes (Eq. 1), procedeu-se a

classificação da capacidade de uso do solo para propriedade modelo (Figura 2). Todas as simulações foram realizadas utilizando distribuições uniformes.

Todos os processamentos necessários durante a definição da propriedade modelo e da capacidade de uso do solo da mesma foram realizados no software ArcGIS (ESRI, 2015).

3.3.2. Banco de Dados

Os fluxos de caixa presentes na Tabela 2 constituíram o banco de dados.

Tabela 2. Fluxos de caixa associados as atividades produtivas consideradas no estudo. j = rotação, n = período no fluxo de caixa, C(i) = capacidade de uso do solo requerida pela atividade “i”.

Atividade (i)	j	n	Custo	Produção	Receita	Saldo	C(i)	Fonte
Abandono	1	0	0	-	0	0	1	Autor
				(t/ha)				
	1	0	26848	30	14400	-12448		
Cultivo de Banana	2	1	13549	35	16800	3251	4	AGRIANUAL, 2017
	3	2	14194	40	19200	5006		
	4	3	29757	45	43200	13443		
	5	4	29757	45	43200	13443		
				(@/ha)				
	1	0	8761	0	0	-8761		
	2	1	2628	0	0	-2628		
	3	2	2290	0	0	-2290		
	4	3	3369	10	1190	-2179		
	5	4	5392	25	20000	14608		
	6	5	5392	40	20000	14608		
	7	6	5392	50	20000	14608		
	8	7	5392	65	20000	14608		
	9	8	5392	80	20000	14608		
	10	9	6214	90	12000	5786		
	11	10	6214	90	12000	5786		
Cultivo de Cacau	12	11	6214	90	12000	5786	7	AGRIANUAL, 2017
	13	12	6214	90	12000	5786		
	14	13	6214	90	12000	5786		
	15	14	6214	90	12000	5786		
	16	15	6214	90	12000	5786		
	17	16	6214	90	12000	5786		
	18	17	6214	90	12000	5786		
	19	18	6214	90	12000	5786		
	20	19	6214	90	12000	5786		
	21	20	6214	90	12000	5786		
	22	21	6214	90	12000	5786		
	23	22	6214	90	12000	5786		
	24	23	6214	90	12000	5786		

Atividade (i)	j	n	Custo	Produção	Receita	Saldo	C(i)	Fonte
	25	24	6214		90	12000	5786	
	26	25	6214		90	12000	5786	
	27	26	6214		90	12000	5786	
	28	27	6214		90	12000	5786	
	29	28	6214		90	12000	5786	
	30	29	6214		40	12000	5786	
				(sc/ha)				
	1	0	17548		0	0	-17548	
	2	1	6834		0	0	-6834	
	3	2	10509		20	8343	-2166	
	4	3	12268		40	16685	4417	
	5	4	12268		40	16685	4417	
	6	5	12268		40	16685	4417	
	7	6	12268		40	16685	4417	
	8	7	12268		40	16685	4417	
Cultivo de Café	9	8	12268		40	16685	4417	6 AGRIANUAL, 2017
	10	9	12268		40	16685	4417	
	11	10	12268		40	16685	4417	
	12	11	12268		40	16685	4417	
	13	12	12268		40	16685	4417	
	14	13	12268		40	16685	4417	
	15	14	12268		40	16685	4417	
	16	15	12268		40	16685	4417	
	17	16	12268		40	16685	4417	
	18	17	12268		40	16685	4417	
				(frutos/ha)				
	1	0	6833		0	0	-6833	
	2	1	5363		0	0	-5363	
	3	2	6250		0	0	-6250	
	4	3	12437		5125	13977	1540	
	5	4	12437		11275	13977	1540	
	6	5	12437		15375	13977	1540	
	7	6	12437		18450	13977	1540	
	8	7	12437		20500	13977	1540	
	9	8	12437		22550	13977	1540	
	10	9	12437		24600	13977	1540	
	11	10	16201		26650	22120	5919	
Cultivo de Coco	12	11	16201		26650	22120	5919	6 AGRIANUAL, 2017
	13	12	16201		26650	22120	5919	
	14	13	16201		26650	22120	5919	
	15	14	16201		26650	22120	5919	
	16	15	16201		26650	22120	5919	
	17	16	16201		26650	22120	5919	
	18	17	16201		26650	22120	5919	
	19	18	16201		26650	22120	5919	
	20	19	16201		26650	22120	5919	
	21	20	16201		26650	22120	5919	
	22	21	16201		26650	22120	5919	
	23	22	16201		26650	22120	5919	
	24	23	16201		26650	22120	5919	
	25	24	16201		26650	22120	5919	

Atividade (i)	j	n	Custo	Produção	Receita	Saldo	C(i)	Fonte
	26	25	16201		26650	22120	5919	
	27	26	16201		26650	22120	5919	
	28	27	16201		26650	22120	5919	
	29	28	16201		26650	22120	5919	
	30	29	16201		26650	22120	5919	
				Seringueira (kg BS/ha)	Cacau (@/ha)			
	1	0	7381	0	0	0	-7381	
	2	1	3486	0	0	0	-3486	
	3	2	2690	0	0	0	-2690	
	4	3	2922	0	0	0	-2922	
	5	4	7674	0	0	0	-7674	
	6	5	2914	0	0	0	-2914	
	7	6	3989	0	0	0	-3989	
	8	7	7720	338	0	2325	-5394	
	9	8	7199	663	18	6595	-604	
	10	9	8145	1025	36	11120	2975	
	11	10	7877	1266	60	15490	7613	
	12	11	7903	1447	60	17400	9497	
	13	12	9174	1447	60	17400	8226	
	14	13	8177	1447	60	17400	9223	
Seringueira Consoiciada com Cacau	15	14	9294	1447	60	17400	8106	7 Cotta, 2005
	16	15	9874	1447	60	17400	7526	
	17	16	9294	1447	60	17400	8106	
	18	17	10063	1447	60	17400	7337	
	19	18	9849	1447	60	17400	7551	
	20	19	9320	1447	60	17400	8080	
	21	20	9294	1447	60	17400	8106	
	22	21	9874	1447	60	17400	7526	
	23	22	10037	1447	60	17400	7363	
	24	23	9320	1447	60	17400	8080	
	25	24	9849	1447	60	17400	7551	
	26	25	9320	1447	60	17400	8080	
	27	26	9294	1447	60	17400	8106	
	28	27	10618	1447	60	17400	6782	
	29	28	9294	1447	60	17400	8106	
	30	29	9320	1447	60	17400	8080	
					(m³/ha)			
	1	0	5000		0	0	-5000	
	2	1	800		0	0	-800	
	3	2	800		0	0	-800	
	4	3	800		0	0	-800	
	5	4	800		0	0	-800	
	6	5	800		0	0	-800	
Cultivo de Eucalipto	7	6	2017		300	13500	11483	7 Adaptado de AGRIANUAL, 2017
	8	7	900		0	0	-900	
	9	8	900		0	0	-900	
	10	9	900		0	0	-900	
	11	10	900		0	0	-900	
	12	11	900		0	0	-900	
	13	12	1480		270	12150	10670	

Atividade (i)	j	n	Custo	Produção	Receita	Saldo	C(i)	Fonte
				(t/ha)				
Cultivo de Limão	1	0	13539	0	0	-13539	6	AGRIANUAL, 2017
	2	1	6591	0	0	-6591		
	3	2	8930	4	3135	-5795		
	4	3	13482	8	18813	5331		
	5	4	13482	17	18813	5331		
	6	5	13482	25	18813	5331		
	7	6	13482	33	18813	5331		
	8	7	13482	42	18813	5331		
	9	8	16596	33	25084	8488		
	10	9	16596	33	25084	8488		
	11	10	16596	33	25084	8488		
	12	11	16596	33	25084	8488		
				(t/ha)				
Cultivo de Manga	1	0	10112	0	0	-10112	6	AGRIANUAL, 2017
	2	1	3848	0	0	-3848		
	3	2	5168	0	0	-5168		
	4	3	6848	8	10112	3264		
	5	4	12508	12	15168	2660		
	6	5	12502	16	20224	7722		
	7	6	12502	16	20224	7722		
	8	7	12502	16	20224	7722		
	9	8	12502	16	20224	7722		
	10	9	12502	16	20224	7722		
	11	10	12502	16	20224	7722		
	12	11	12502	16	20224	7722		
	13	12	12502	16	20224	7722		
	14	13	12502	16	20224	7722		
	15	14	12502	16	20224	7722		
	16	15	12502	16	20224	7722		
	17	16	12502	16	20224	7722		
	18	17	12502	16	20224	7722		
	19	18	12502	16	20224	7722		
	20	19	12502	16	20224	7722		
Cultivo de Maracujá	1	0	53674	(t/ha) 38	60800	7126	4	AGRIANUAL, 2017
Pousio	1	0	0	-	0	0	7	-
Isolamento	-	8	Autor
	5	4	0	-	0	0		
Reflorestamento	1	0	999	-	0	-999	8	Autor
	2	1	350	-	0	-350		
	3	2	350	-	0	-350		
	4	3	175	-	0	-175		
	5	4	175	-	0	-175		
	6	5	175	-	0	-175		
	7	6	175	-	0	-175		
	8	7	175	-	0	-175		
	9	8	175	-	0	-175		
	10	9	175	-	0	-175		
	11	10	175	-	0	-175		

Atividade (i)	j	n	Custo	Produção	Receita	Saldo	C(i)	Fonte
	12	11	175		-	0	-175	
	13	12	175		-	0	-175	
	14	13	175		-	0	-175	
	15	14	175		-	0	-175	
	16	15	175		-	0	-175	
	17	16	175		-	0	-175	
	18	17	175		-	0	-175	
	19	18	175		-	0	-175	
	20	19	175		-	0	-175	
	21	20	175		-	0	-175	
	22	21	175		-	0	-175	
	23	22	175		-	0	-175	
	24	23	175		-	0	-175	
	25	24	175		-	0	-175	
	26	25	175		-	0	-175	
	27	26	175		-	0	-175	
	28	27	175		-	0	-175	
	29	28	175		-	0	-175	
	30	29	175		-	0	-175	

A atividade abandono, corresponde a ausência de manejo conservacionista adequado na unidade de manejo, enquanto pousio, refere-se à interrupção da produção.

A fim de exemplificar a utilização conjunta de estratégias para recuperação de áreas de preservação, foram consideradas as atividades de isolamento e reflorestamento. A primeira consiste no isolamento da unidade de manejo, a fim de facilitar a regeneração natural, iniciando o processo de recuperação. Já a segunda, consiste no enriquecimento da área através do plantio de espécies nativas.

3.3.3. Cenário Inicial

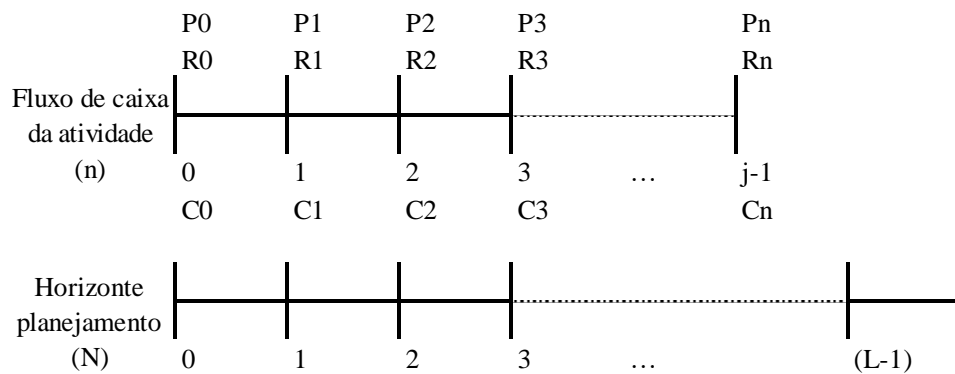
A criação do cenário inicial foi realizada a partir da seleção das seguintes atividades: abandono, cultivo de cacau, café, coco e seringueira consorciada com cacau. Utilizando distribuição homogênea, procedeu-se a simulação das atividades em diferentes idades para as unidades de manejo da propriedade modelo. A variação de idade foi feita para proporcionar um cenário inicial heterogêneo em relação ao estado produtivo das atividades em seus respectivos ciclos produtivos. Ao final desta etapa, obteve-se um arquivo matricial representando as atividades existentes na propriedade modelo no início do horizonte de planejamento. Atividades presentes no cenário inicial foram denominadas de atividades iniciais.

3.3.4. Definição das Prescrições e Modelo Numérico de Otimização

Neste estudo, o valor presente líquido (VPL) foi selecionado como coeficiente econômico associado as prescrições, as quais foram sempre designadas no início de cada ano considerando quatro especificações: i = atividade; j = rotação da atividade, em anos; l = ano da designação e k = unidade de manejo. Ou seja, “ $ijkl$ ” corresponde a uma prescrição. “ $j - 1$ ” representa o período (n) no fluxo de caixa da atividade enquanto “ $l - 1$ ” representa o período no horizonte de planejamento (N).

Considerando um horizonte de planejamento com duração de L anos, existem dois tipos de prescrições: atividades a serem executadas ao longo do planejamento, denominadas “atividades futuras”, e atividades que já se encontram implantadas no início do horizonte de planejamento, denominadas “atividades atuais”.

Quando prescrições “ $ijkl$ ”, envolvendo atividades futuras, foram designadas no primeiro ano do horizonte de planejamento ($l = 1, N = 0$), os períodos do fluxo de caixa da atividade (n) coincidiram com os períodos do planejamento (N).

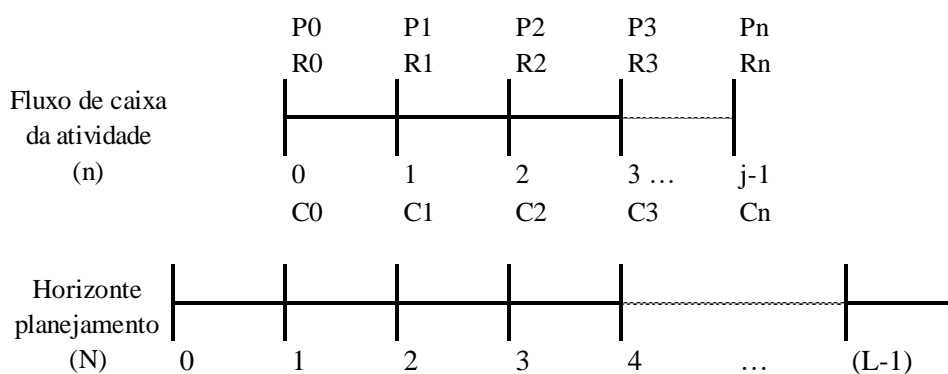


Nestas situações, o valor presente líquido foi calculado através da descapitalização da receita líquida para o período zero do fluxo de caixa da atividade, que corresponde também ao período zero do horizonte de planejamento.

$$VPL_{ijl} = \frac{(R_0 - C_0)}{(1 + r)^0} + \frac{(R_1 - C_1)}{(1 + r)^1} + \frac{(R_2 - C_2)}{(1 + r)^2} + \frac{(R_3 - C_3)}{(1 + r)^3} + \dots + \frac{(R_n - C_n)}{(1 + r)^n}$$

$$VPL_{ijl} = \sum_{n=0}^{(j-1)} \frac{(R_n - C_n)}{(1 + r)^n}$$

No entanto, quando as prescrições “ijkl” foram designadas a partir do segundo ano do planejamento ($l \geq 2$, $N \geq 1$), os períodos do fluxo de caixa da atividade e do planejamento não coincidiram ($n \neq N$).



Nestes casos, o somatório da receita líquida foi descapitalizado mais “l-1” vezes, para corresponder ao valor presente líquido no horizonte de planejamento. Desta forma:

$$VPL_{ijl} = \frac{\frac{(R_0 - C_0)}{(1+r)^0} + \frac{(R_1 - C_1)}{(1+r)^1} + \frac{(R_2 - C_2)}{(1+r)^2} + \frac{(R_3 - C_3)}{(1+r)^3} + \dots + \frac{(R_n - C_n)}{(1+r)^n}}{(1+r)^{l-1}}$$

Portanto, o valor presente líquido das prescrições, envolvendo atividades futuras, foi calculado a partir da seguinte equação:

$$VPL_{ijl} = \sum_{n=0}^{(j-1)} \frac{(R_n - C_n)}{(1+r)^{n+(l-1)}} \quad (2)$$

em que:

VPL_{ijl} = valor presente líquido da atividade “i” com rotação “j” designada a unidade de manejo no ano “l” do horizonte de planejamento;

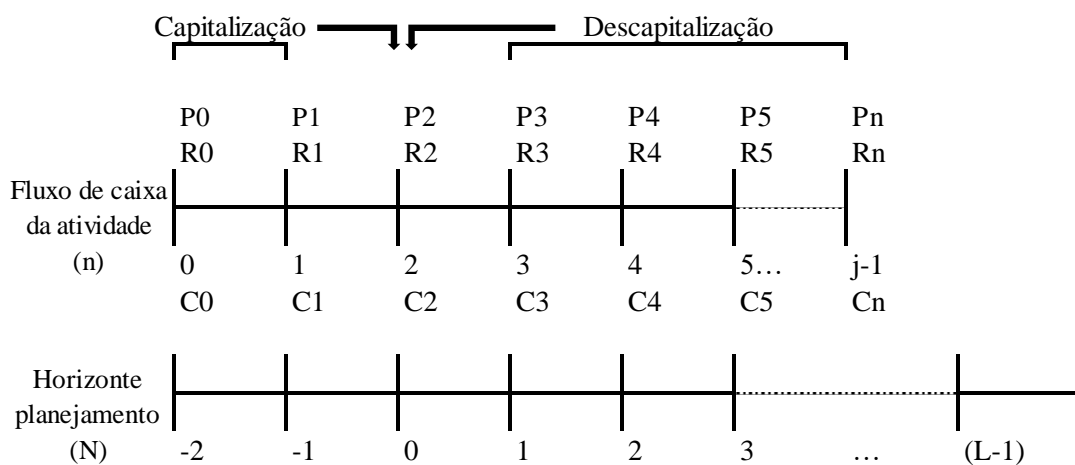
R_n = receita da atividade no período “n” de seu fluxo de caixa;

C_n = custo da atividade no período “n” de seu fluxo de caixa;

r = taxa de juros.

Para prescrições “ijkl”, envolvendo atividades atuais, foi considerada a manutenção da atividade, através da extensão de sua rotação até a especificação “j”. Nestas prescrições a especificação “l” deve ser igual a 1 (um) para corresponder a uma

prescrição válida. O fluxo de caixa de atividades atuais em relação ao horizonte de planejamento, pode ser ilustrado da seguinte forma:



Uma atividade atual i , com dois anos de idade ($n = 1$), por exemplo, apresenta os dois primeiros períodos do seu fluxo de caixa anteriores ao período zero do planejamento. Para calcular o VPL desta prescrição, as duas primeiras receitas e custos devem ser capitalizados para o período zero do planejamento, enquanto demais receitas e custos, descapitalizados.

$$VPL_{ijl} = \frac{(R_0 - C_0)}{(1+r)^{0-(2)}} + \frac{(R_1 - C_1)}{(1+r)^{1-(2)}} + \frac{(R_2 - C_2)}{(1+r)^{2-(2)}} + \frac{(R_3 - C_3)}{(1+r)^{3-(2)}} + \dots + \frac{(R_n - C_n)}{(1+r)^{n-(2)}}$$

Desta forma, para o cálculo do VPL de atividades atuais, o termo “-m” foi adicionado na Equação 2, resultando na Equação 3.

$$VPL_{ijl} = \sum_{n=0}^{(j-1)} \frac{(R_n - C_n)}{(1+r)^{n+(l-1)-m}} \quad (3)$$

em que:

VPL_{ijl} = valor presente líquido da atividade “ i ” com rotação “ j ” designada a unidade de manejo no ano “ l ” do horizonte de planejamento;

R_n = receita da atividade no período “ n ” de seu fluxo de caixa;

C_n = custo da atividade no período “ n ” de seu fluxo de caixa;

m = idade da atividade no início do horizonte de planejamento;

r = taxa de juros.

Para este estudo foi considerado uma taxa de juros (r) igual a 8% a.a.

Atividades futuras foram: pousio, isolamento, reflorestamento e cultivos de banana, cacau, café, coco, eucalipto, limão, manga, maracujá e, ou, seringueira consorciada com cacau. Quando possível, a manutenção das atividades iniciais através da extensão de sua rotação também foi considerada. Ao final desta etapa, foi obtida uma lista contendo as possíveis prescrições para o problema.

Utilizando a linguagem de programação R, procedeu-se a criação de uma rotina computacional para extração dos coeficientes associados a cada prescrição. Desta forma, a partir do banco de dados inicial, contendo os fluxos de caixa das atividades, foi possível a associação das prescrições a seus respectivos coeficientes. Ao final desta etapa, obteve-se a formulação numérica do modelo de programação matemática. Considerou-se, para a propriedade modelo ($t = 900$), 12 atividades futuras mais 900 atividades iniciais, totalizando 912 atividades ($m = 912$) com suas respectivas opções de rotação. Além disso, foi adotado um horizonte de planejamento de 30 anos ($p = 30$, $h = 30$ e $H = 30$). Em relação as restrições, estipulou-se R\$ 12000 ($S > 12000$) como saldo mínimo para todos os anos do planejamento. Considerou-se, também, uma produção mínima de 1500 frutos para coco e zero para os demais produtos, banana, cacau, café, borracha seca (seringueira), madeira (eucalipto), limão, manga e maracujá. Em relação a produção máxima, definiu-se 3000 @ para cacau e 100000 unidades para os demais produtos. A capacidade de uso do solo, por sua vez, foi definida segundo a simulação realizada e utilizada como restrição.

Finalmente, utilizou-se o solver GUROBI (Gurobi, 2017) para a resolução do problema e através do software de SIG, ArcGIS, obteve-se o mapeamento da solução para cada ano do horizonte de planejamento. Para os resultados, toda a produção foi convertida em toneladas por hectare, através dos seguintes fatores: 1@ = 15kg, 1sc = 60 kg, 1 fruto de coco = 2kg e densidade básica do eucalipto = 460kg/m³.

4. Resultados e Discussão

4.1. Modelo Matemático

Função Objetivo

Uma vez que o objetivo do problema é a maximização do valor presente líquido (VPL) das atividades (existentes e futuras) da propriedade, a função objetivo do modelo de programação inteira foi definida da seguinte forma:

$$MAX \sum_i^I \sum_j^{J_i} \sum_k^K \sum_l^L X_{ijkl} * VPL_{ijl} \quad (4)$$

em que:

I = variável de entrada que representa o número total de atividades, ou seja, todas as atividades existentes no início do horizonte de planejamento mais as atividades de interesse futuro. $i = 1 \dots I$;

J_i = variável de entrada que representa o número total de possíveis rotações economicamente viáveis para a atividade “ i ”, $i = 1 \dots J_i$;

K = variável de entrada que representa o número total de unidades produtivas, $k = 1 \dots K$;

L = variável de entrada que representa o número total de anos do horizonte de planejamento, $l = 1 \dots L$;

VPL_{ijl} = variável de entrada que representa o valor presente líquido associado a atividade “ i ” com rotação “ j ” designada no ano “ l ” do horizonte de planejamento;

X_{ijkl} = variável decisória que representa designar ou não a atividade “ i ” com rotação “ j ” à unidade produtiva “ k ” no ano “ l ” do horizonte de planejamento.

Restrições

Saldo Mínimo:

Durante os anos do horizonte de planejamento (h), o saldo auferido deve ser maior ou igual a um valor mínimo pré-estabelecido (S_h). Assim:

$$\sum_i^I \sum_j^{J_i} \sum_k^K \sum_l^L X_{ijkl} * s_{ijlh} \geq S_h \quad \forall h = 1 \dots H; \quad (5)$$

em que:

s_{ijlh} = variável de entrada que representa o saldo, no ano “h”, da prescrição “ijl”;

S_h = saldo mínimo requerido no ano “h” do horizonte de planejamento;

H = variável de entrada que representa o número total de anos do horizonte de planejamento.

Duração Máxima:

Para todas as unidades (k), a soma das durações das atividades selecionadas não deve ultrapassar o tamanho do horizonte de planejamento (H). Ou seja:

$$\sum_i^I \sum_j^{J_i} \sum_l^L X_{ijkl} * (r_{ij} - m_i) \leq H \quad \forall k = 1 \dots t; \quad (6)$$

em que:

r_{ij} = variável de entrada que representa a rotação “j” da atividade “ij”;

m_i = idade da atividade “i”, em anos, no início do horizonte de planejamento. Para atividades futuras, $m_i = 0$;

H = variável de entrada que representa o número total de anos do horizonte de planejamento.

Singularidade:

Em todos os anos do horizonte de planejamento (h), assim como em todas as unidades de manejo (k), deve existir apenas uma atividade (X_{ijkl}) implantada, o que resulta em:

$$\sum_i^I \sum_j^{J_i} \sum_l^L X_{ijkl} * p_{ijlh} = 1 \quad \forall k = 1 \dots K; h = 1 \dots H; \quad (7)$$

em que:

p_{ijlh} = variável de entrada que representa a ocupação da unidade produtiva, no ano “h”, pela prescrição “ijl”;

H = variável de entrada que representa o número total de anos do horizonte de planejamento.

Capacidade de Uso do Solo:

Em todos os anos do horizonte de planejamento (h), a capacidade do solo requerida pela atividade (i) deve ser adequada (maior ou igual) a capacidade produtiva da unidade de manejo (k), definida segundo Rio Grande do Sul (1983). Deste modo:

$$\sum_i^I \sum_j^{J_i} \sum_l^L X_{ijkl} * c_i \geq C_k \quad \forall k = 1 \dots K; h = 1 \dots H; \quad (8)$$

em que:

c_i = variável de entrada que representa a capacidade de uso do solo requerida pela atividade “i”;

C_k = variável de entrada que representa a capacidade de uso do solo da unidade produtiva “k”;

H = variável de entrada que representa o número total de anos do horizonte de planejamento.

Produção Mínima:

Em todos os anos do horizonte de planejamento (h), a produção deve ser maior ou igual ao valor mínimo pré-estabelecido para cada produto (d_{hn}). Portanto:

$$\sum_i^I \sum_j^{J_i} \sum_k^K \sum_l^L X_{ijkl} * q_{ijlhn} \geq d_{hn} \quad \forall h = 1 \dots H; n = 1 \dots N; \quad (9)$$

em que:

n = variável de entrada que representa o número total de produtos produzidos pelas I atividades, $n = 1 \dots N$;

q_{ijlhn} = variável de entrada que representa a produção do produto “n” no ano “h” pela a prescrição “ijl”;

d_{hn} = variável de entrada que representa a demanda mínima do produto “n” no ano “h” do horizonte de planejamento;

H = variável de entrada que representa o número total de anos do horizonte de planejamento.

Produção Máxima:

Em todos os anos do horizonte de planejamento (h), a produção não deve ultrapassar o valor máximo pré-estabelecido para cada produto (D_{hn}). Portanto:

$$\sum_i^I \sum_j^{J_i} \sum_k^K \sum_l^L X_{ijkl} * q_{ijlhn} \geq D_{hn} \quad \forall h = 1 \dots H; n = 1 \dots N; \quad (10)$$

em que:

n = variável de entrada que representa o número total de produtos produzidos pelas I atividades, $n = 1 \dots N$;

q_{ijlhn} = variável de entrada que representa a produção do produto “ n ” no ano “ h ” pela a prescrição “ ijl ”;

D_{hn} = variável de entrada que representa a demanda máxima do produto “ n ” no ano “ h ” do horizonte de planejamento;

H = variável de entrada que representa o número total de anos do horizonte de planejamento.

Opções de recuperação:

Existem duas possibilidades de recuperação de unidades de manejo destinadas a conservação, isolamento com reflorestamento ou apenas reflorestamento, ou seja:

$$X_{ijkl} \leq X_{i'jkl} \quad \forall k = 1 \dots t; i = \text{isolamento}; i' = \text{reflorestamento}; \quad (11)$$

Ordenamento da Recuperação:

Caso a recuperação seja realizada com isolamento, este deve ser obrigatoriamente realizado antes do reflorestamento. Assim:

$$X_{ijkl} * l_{ik} \leq X'_{ijkl} * l'_{ik} \quad \forall k = 1 \dots t; i = \text{isolamento}; i' = \text{reflorestamento}; \quad (12)$$

em que:

l_{ik} = variável de entrada que representa o ano em que a atividade “i” é designada a unidade produtiva “k”.

Reflorestamento:

Em todas as unidades de manejo (k), deve haver no máximo uma atividade “reflorestamento” prescrita. Desta forma:

$$\sum_j^{n_i} \sum_l^p X_{ijkl} \leq 1 \quad \forall i = \text{reflorestamento}; k = 1 \dots t; \quad (13)$$

Nulidade:

Para todas as unidades de manejo “k”, prescrições envolvendo a manutenção de atividades atuais, apenas são válidas quando estão relacionadas ao primeiro ano do horizonte de planejamento, resultando em:

$$\sum_i^m \sum_j^{n_i} \sum_l^p X_{ijkl} * f_{ik} * l_{ik} \leq 1 \quad \forall k = 1 \dots t; \quad (14)$$

em que:

f_{ik} = variável de entrada que identifica a atividade “i” como a atividade inicial na unidade produtiva “k”. Atividades iniciais recebem valor “1” para esta variável.

Não Negatividade:

$$X_{ijkl} \in \{0,1\} \quad \forall i = 1 \dots m; j = 1 \dots n_i; k = 1 \dots t; l = 1 \dots p; \quad (15)$$

4.2. Estudo de Caso

Na Figura 2 encontra-se a avaliação da capacidade de uso segundo cada fator determinante bem como a classificação da capacidade de uso do solo determinada através da Equação 1.

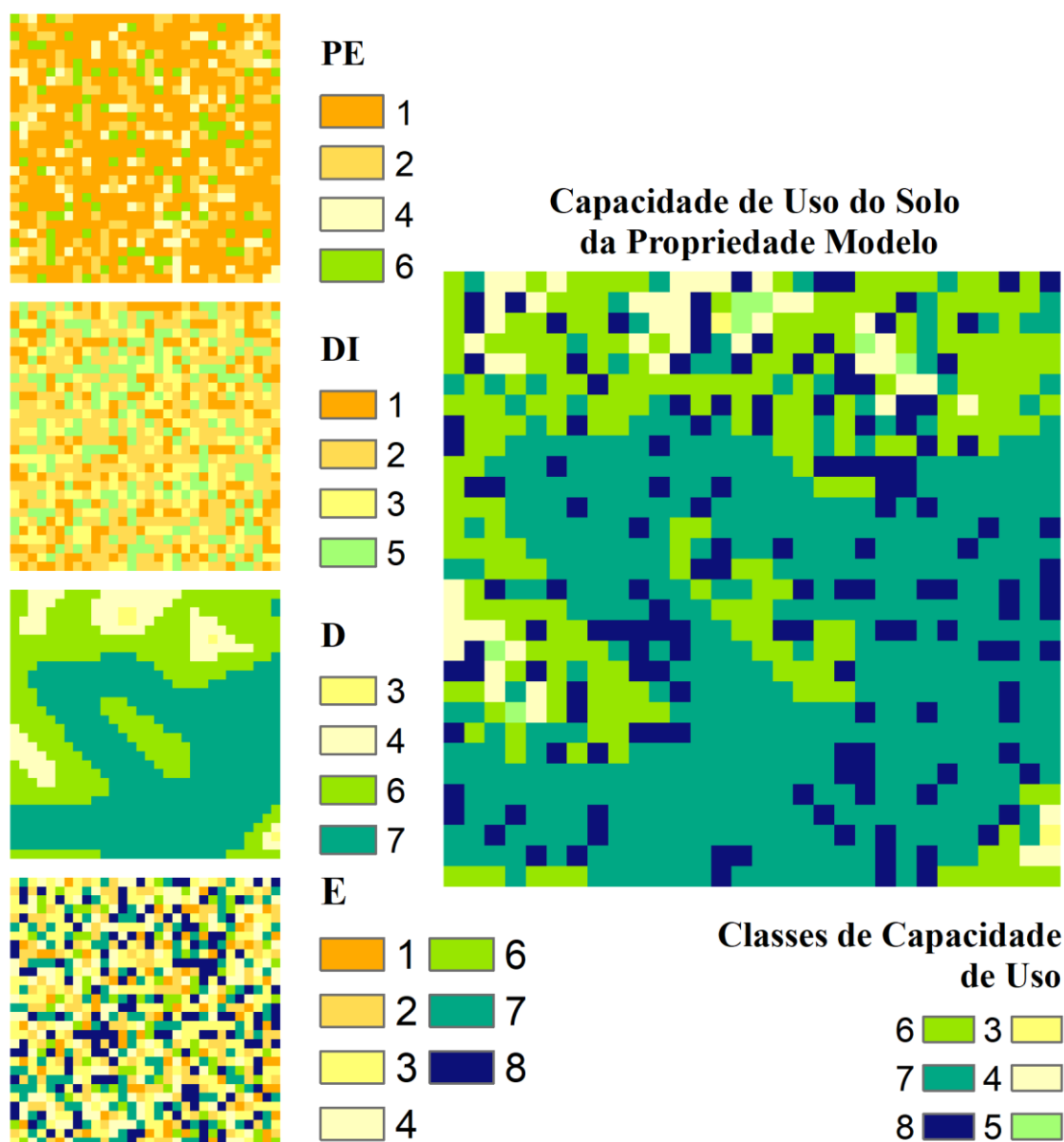


Figura 2. Avaliações da capacidade de uso do solo segundo os fatores determinantes de profundidade efetiva (PE), drenagem interna (DI), declividade (D), propensão a erosão (E) e classificação da capacidade de uso do solo da propriedade modelo.

Nota-se uma mudança abrupta dos fatores determinantes de profundidade efetiva, drenagem interna e propensão a erosão em relação a declividade (Figura 2). Isto ocorre, pois, os três primeiros foram simulados enquanto o último corresponde a dados reais. Esta

variação, por sua vez, contribui de forma positiva para a avaliação do modelo proposto, pois aumenta a diversidade da capacidade de uso do solo das unidades de manejo da propriedade. Ou seja, o modelo é avaliado em unidades compatíveis com atividades produtivas (classes de capacidade 3 a 7) e em unidades adequadas apenas a conservação (classe de capacidade 8).

Na Figura 3, pode-se observar a distribuição espacial das atividades iniciais na propriedade modelo.

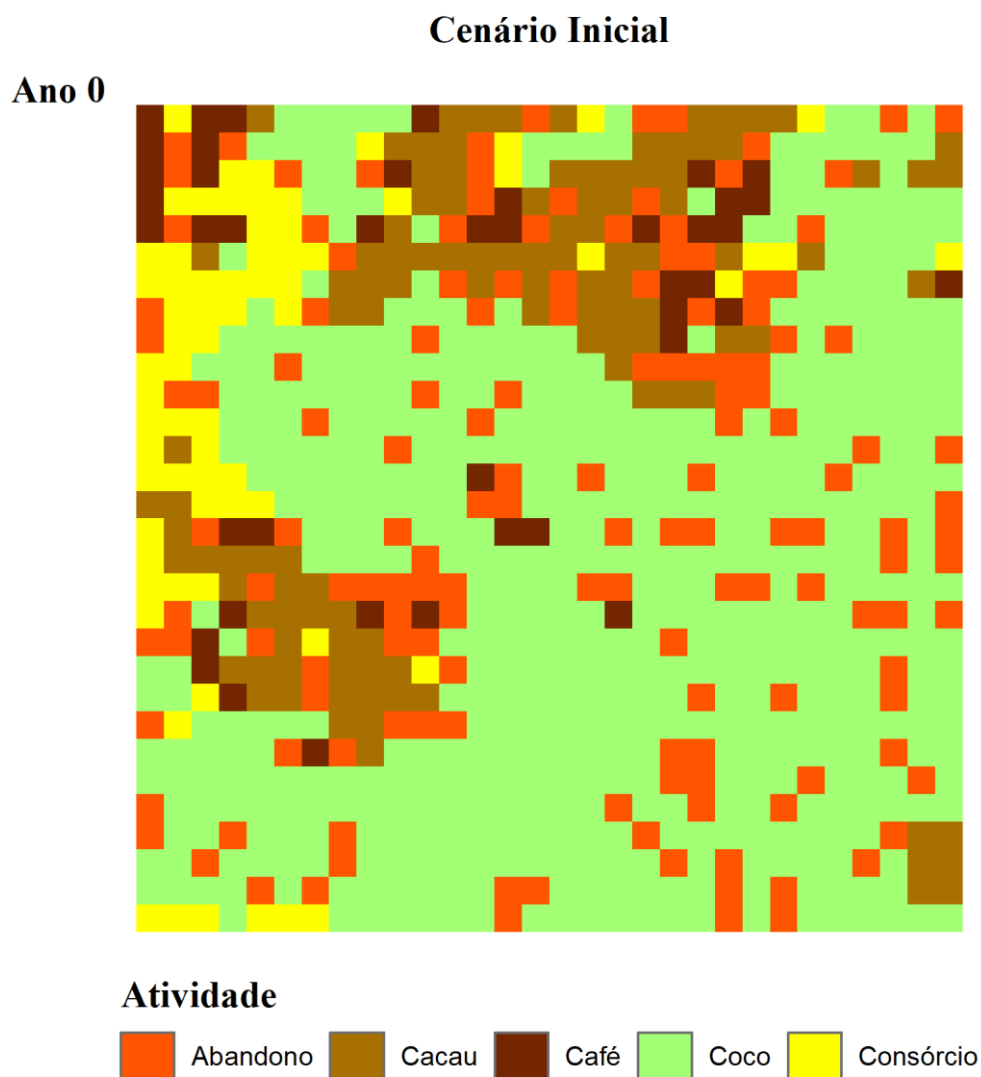


Figura 3. Cenário inicial simulado para a propriedade modelo.

Neste estudo, considerou-se que todas as unidades de manejo destinadas a conservação se encontravam sem manejo adequado, ou seja, abandonadas. Desta forma, estas 149 unidades (5,96ha) correspondem ao passivo ambiental da propriedade.

A existência ou não de políticas de pagamentos por serviços ambientais, por sua vez, pode alterar os fluxos de caixa de atividades conservacionistas e a forma como unidades destinadas a conservação são consideradas no planejamento.

Em locais onde existam pagamentos por serviços ambientais, deve-se considerar a receita oriunda dos serviços prestados no fluxo de caixa da atividade “reflorestamento” e estender a rotação desta atividade para o tamanho do horizonte de planejamento adotado. Nesta situação, todas as áreas destinadas a conservação devem ser incluídas na otimização, estando, ou não, conservadas no início do horizonte de planejamento. Desta forma, a receita auferida dos serviços prestados pelas áreas conservadas e recuperadas é incluído no planejamento. No entanto, a não existência de pagamentos por serviços ambientais torna negativo o VPL de atividades conservacionistas. Nestes casos, estas atividades devem ser entendidas como uma forma de recuperação de áreas destinadas a conservação, as quais não devem ser alteradas uma vez que sejam recuperadas. Portanto, deve-se excluir da otimização áreas destinadas a conservação que estejam sendo devidamente manejadas desde o início do horizonte de planejamento. Deste modo, evita-se que atividades conservacionistas, como o reflorestamento, sejam prescritas a áreas anteriormente recuperadas, gerando custos extras ao planejamento.

A Figura 4, por sua vez, ilustra a adequabilidade das atividades em relação a capacidade de uso do solo para ambos, cenário inicial e horizonte de planejamento. Logo, valores negativos indicam unidades superexploradas; valores iguais a zero correspondem unidades em conformidade de utilização; e valores positivos remetem a unidades subexploradas.

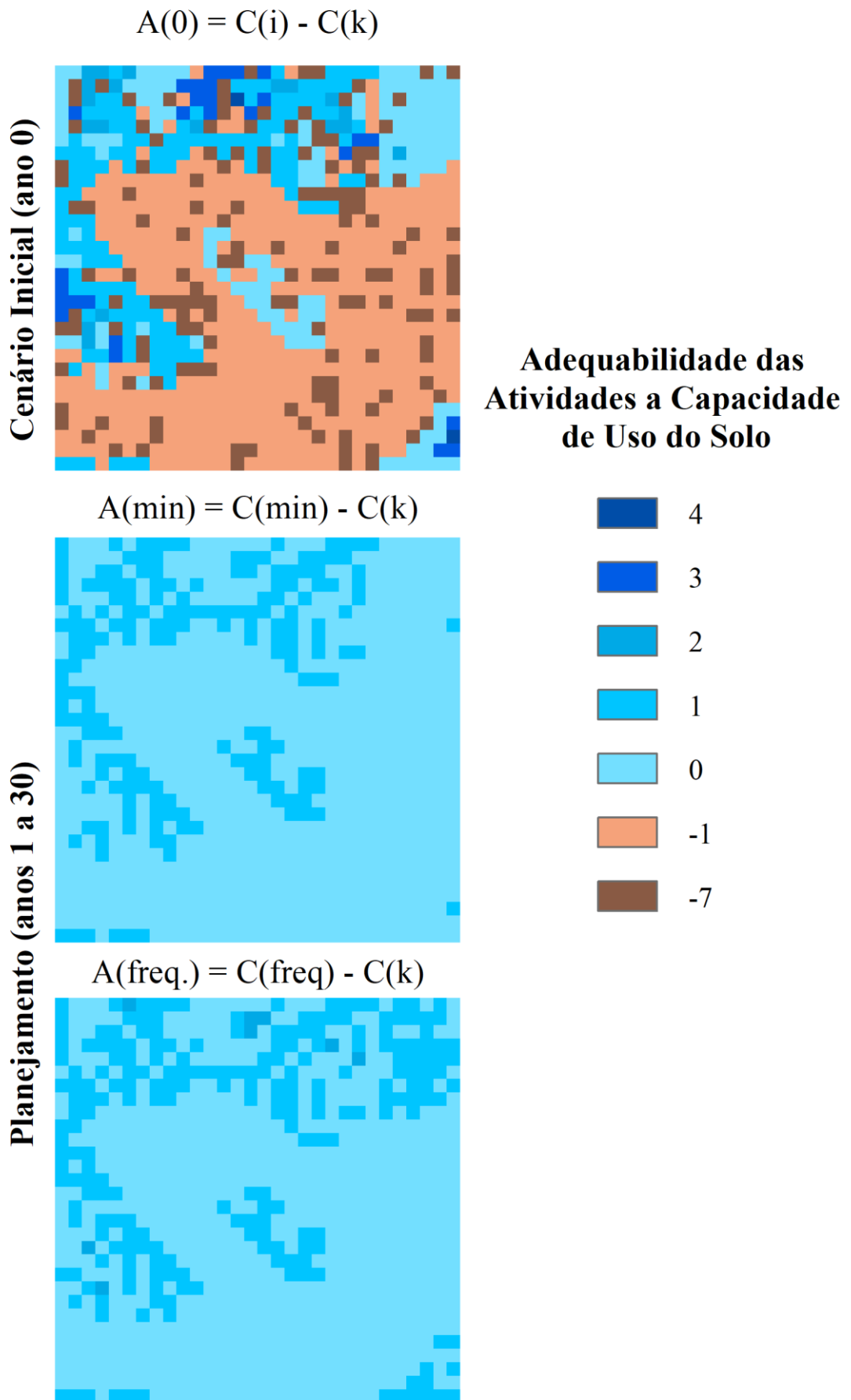


Figura 4. Avaliação da adequabilidade das atividades a capacidade de uso das unidades da propriedade. $A(0)$ = adequabilidade do cenário inicial; $A(\text{min})$ =

adequabilidade mínima do planejamento; $A(\text{freq.})$ = adequabilidade mais frequente do planejamento; $C(i)$ = capacidade de uso do solo requerida pela atividade i no início do horizonte de planejamento; $C(k)$ = capacidade de uso do solo da unidade k ; $C(\text{min})$ = menor capacidade de uso do solo requerida durante o planejamento; $C(\text{freq.})$ = capacidade de uso requerida de forma mais frequente durante o planejamento;

Mesmo que existam unidades superexploradas no cenário inicial (adequabilidade negativa), a aplicação do modelo garante a designação de atividades compatíveis com a capacidade das unidades da propriedade modelo. Ou seja, a utilização conjunta das restrições de singularidade e capacidade (Eq. 7 e 8), promove a produção sustentável nas unidades produtivas (capacidades menores ou iguais a 7) assim como a recuperação das áreas destinadas a conservação (capacidade igual a 8) (Figura 2). Neste sentido, a adequabilidade mínima do planejamento se mantém igual ou superior a zero ainda que altas capacidades de uso do solo sejam requeridas (Figura 4).

Quando não existem áreas a serem recuperadas, o modelo atua na gestão das atividades na propriedade. Nestas circunstâncias, o objetivo é encontrar o equilíbrio entre renovação, implantação e substituição de atividades de forma a manter o saldo mínimo (Eq. 5) e atender as demandas produtivas (Eq. 9 e 10). Portanto, caso o problema possua solução, o modelo encontrará a melhor forma de gestão para as atividades, o que pode incluir a utilização menos intensiva das unidades produtivas. Isto pode ser observado pela adequabilidade mais frequente do planejamento (Figura 4), uma vez que o modelo nem sempre utiliza todo o potencial produtivo da propriedade (adequabilidade ≥ 1). Logo, o modelo contribui para a redução do impacto da produção sob a propriedade.

No entanto, caso existam áreas degradadas, o modelo também programa a recuperação. Através da receita de atividades produtivas, a recuperação é financiada sem a necessidade de financiamentos externos, uma vez que o saldo não é totalmente comprometido (Eq. 5). No entanto, quando não existem políticas de pagamentos por serviços ambientais, a recuperação de áreas representa um desafio ainda maior, pois a mesma envolve custos sem qualquer tipo de compensação financeira. Embora a conservação não seja incentivada nestes casos, a utilização do modelo associada a alternativas menos onerosas de recuperação ainda pode ser uma solução. Esta possibilidade pode ser observada na Figura 5.

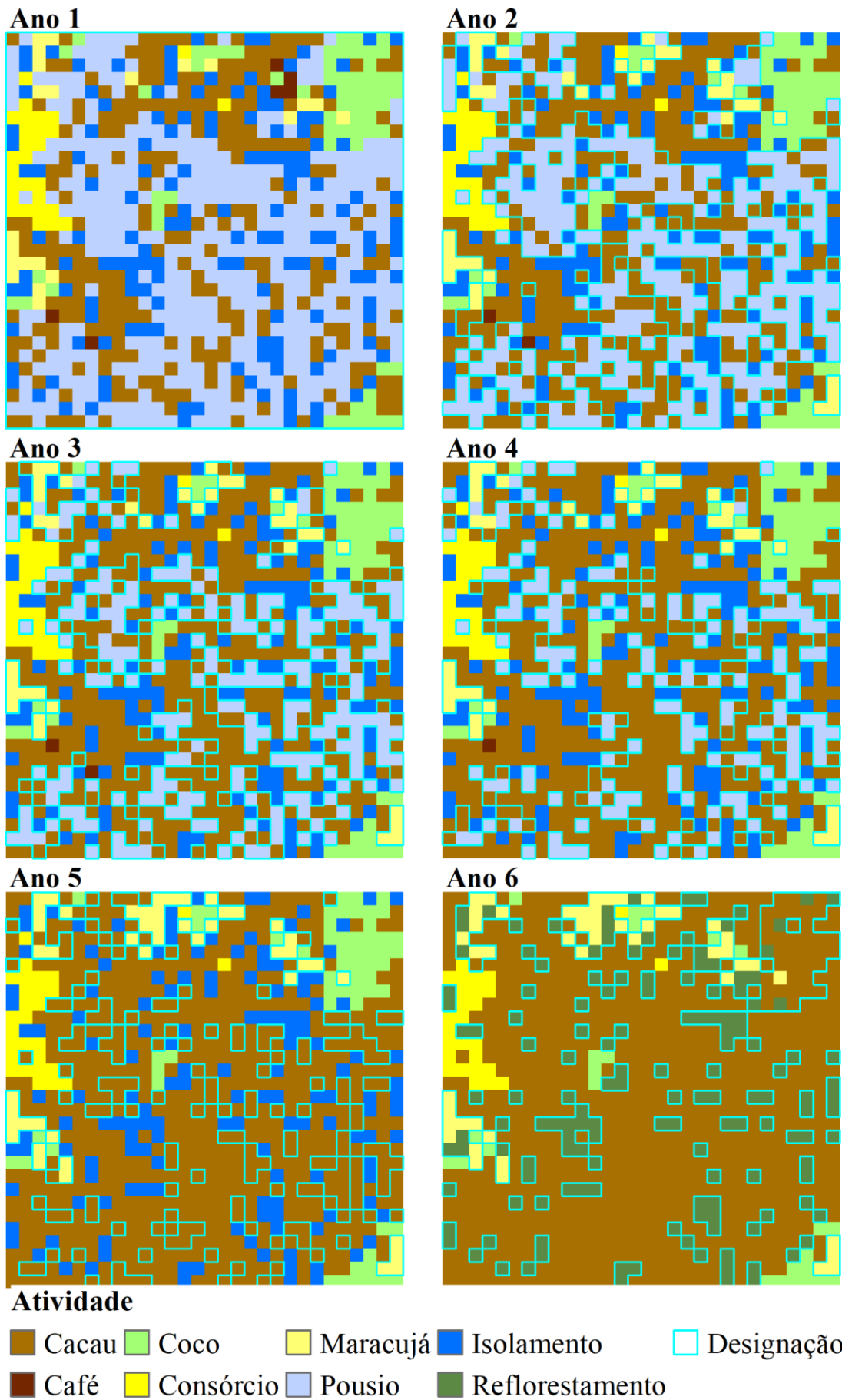


Figura 5. Atividades programadas para a propriedade entre os anos 1 a 6 segundo o modelo proposto.

Quando o isolamento é utilizado em conjunto com o reflorestamento, não é necessário arcar com todos os custos associados a recuperação desde o início do planejamento. Logo, a utilização de técnicas menos onerosas de recuperação, como o isolamento, atua expandindo o espaço de soluções do problema, o que pode viabilizar a recuperação de grandes áreas.

As Figuras 5 a 9 ilustram o planejamento das atividades definido pelo modelo proposto. Nelas é possível observar que a propriedade se encontra em constante processo de transformação. Em um mesmo ano, por exemplo, existem atividades em diferentes etapas do ciclo produtivo, desde atividades recém implantadas até aquelas que próximas a sua substituição. Apesar das desvantagens logísticas associadas a esta distribuição, existem alguns benefícios, tais como: ecológicos, culturas em diferentes idades proporcionam um ambiente variado, o que favorece a atuação de inimigos naturais de pragas e doenças assim como amplia os habitats para a fauna local; estéticos; e hídricos, a substituição gradual de culturas, como não gera grandes áreas de solo exposto, contribui para a infiltração e retenção de água na propriedade.

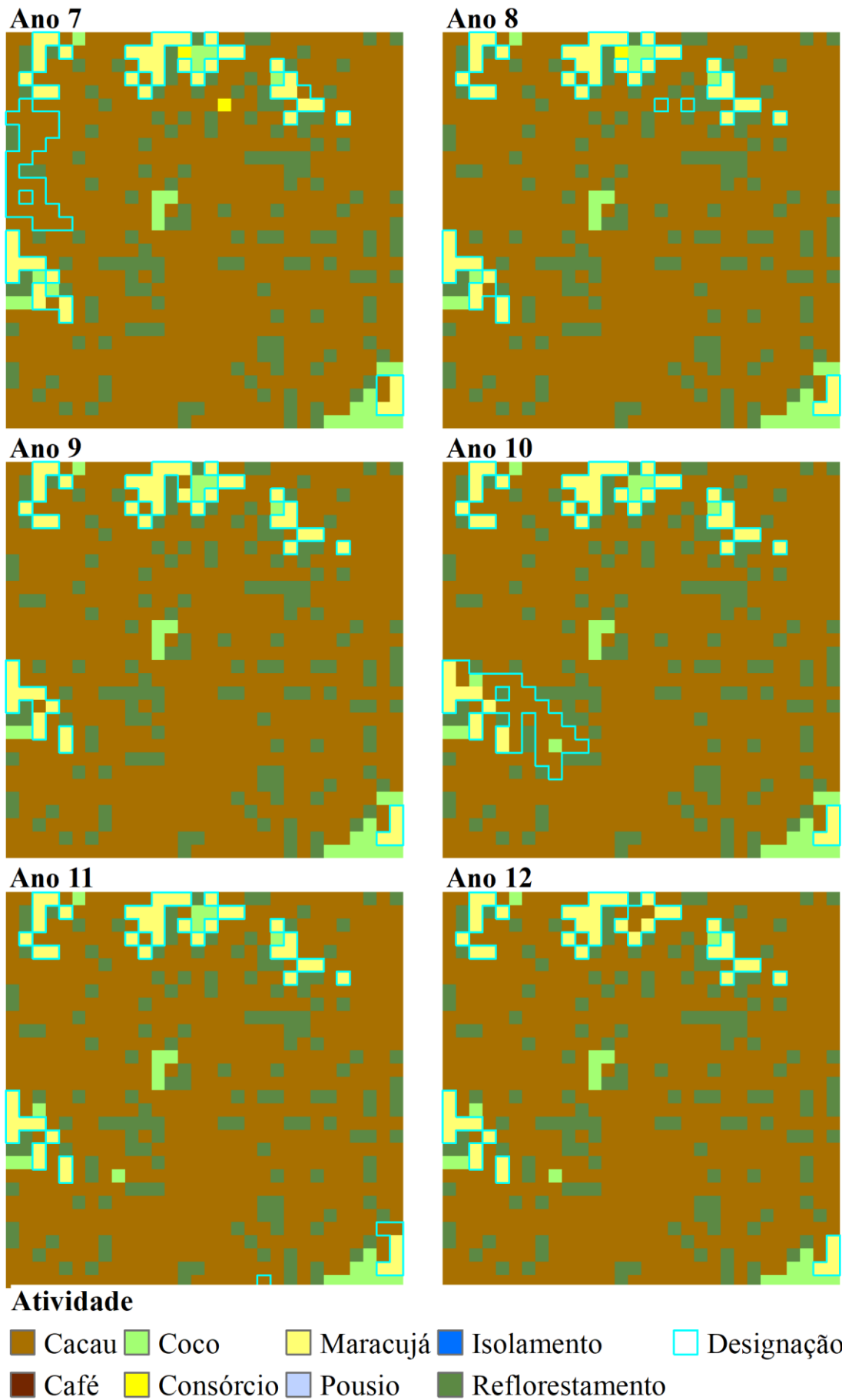


Figura 6. Atividades programadas para a propriedade entre os anos 7 a 12 segundo o modelo proposto.

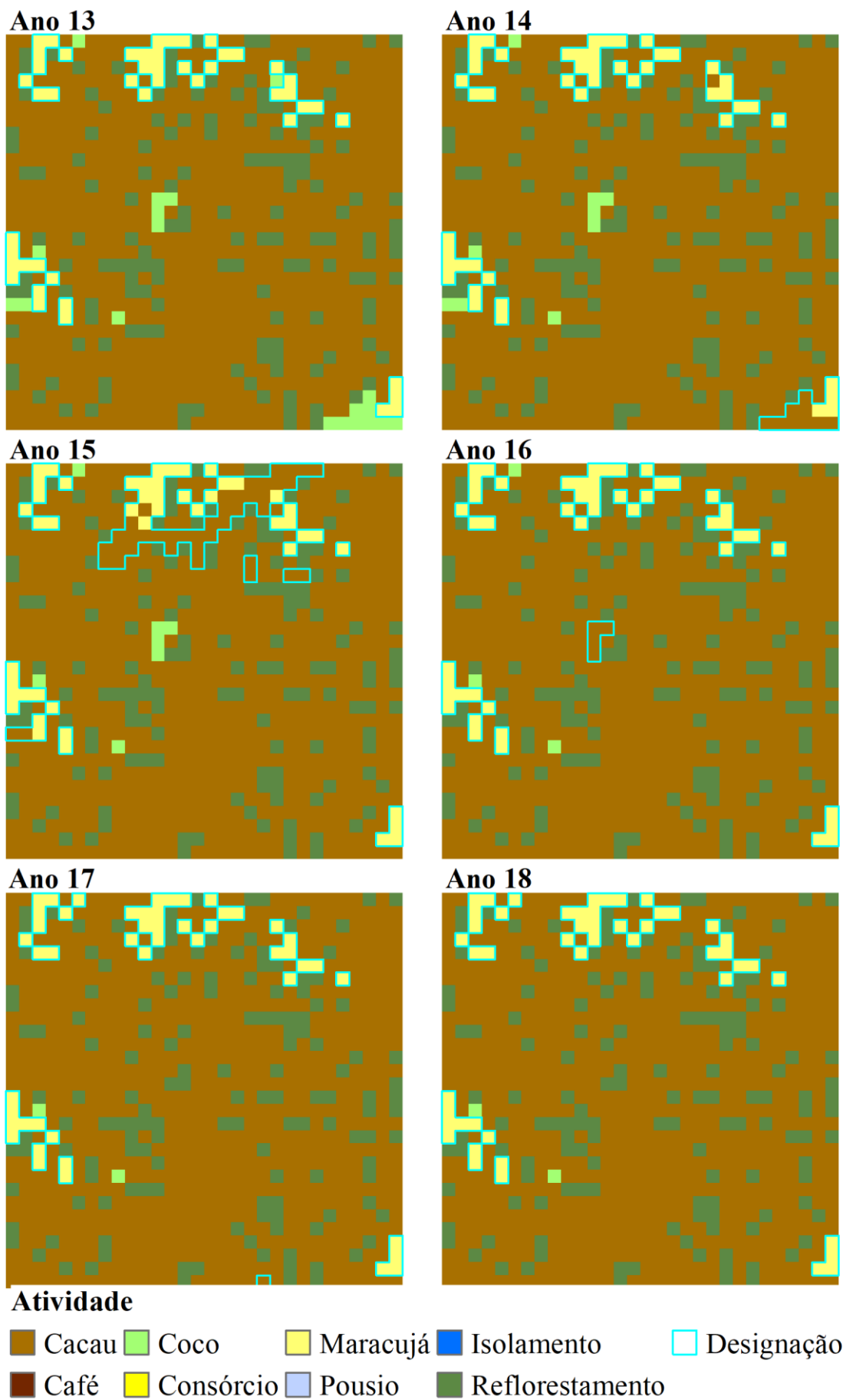


Figura 7. Atividades programadas para a propriedade entre os anos 13 a 18 segundo o modelo proposto.

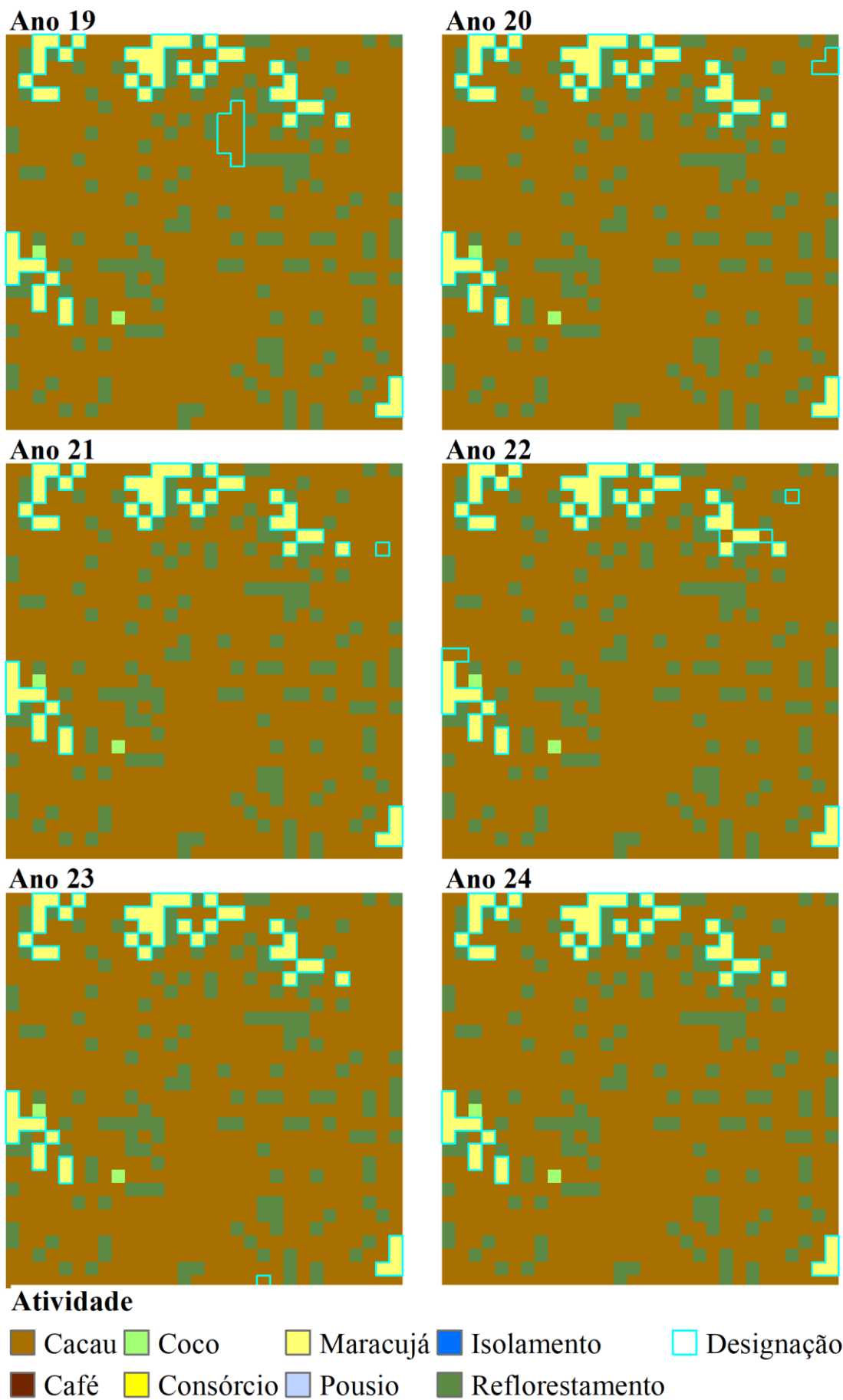


Figura 8. Atividades programadas para a propriedade entre os anos 19 a 24 segundo o modelo proposto.

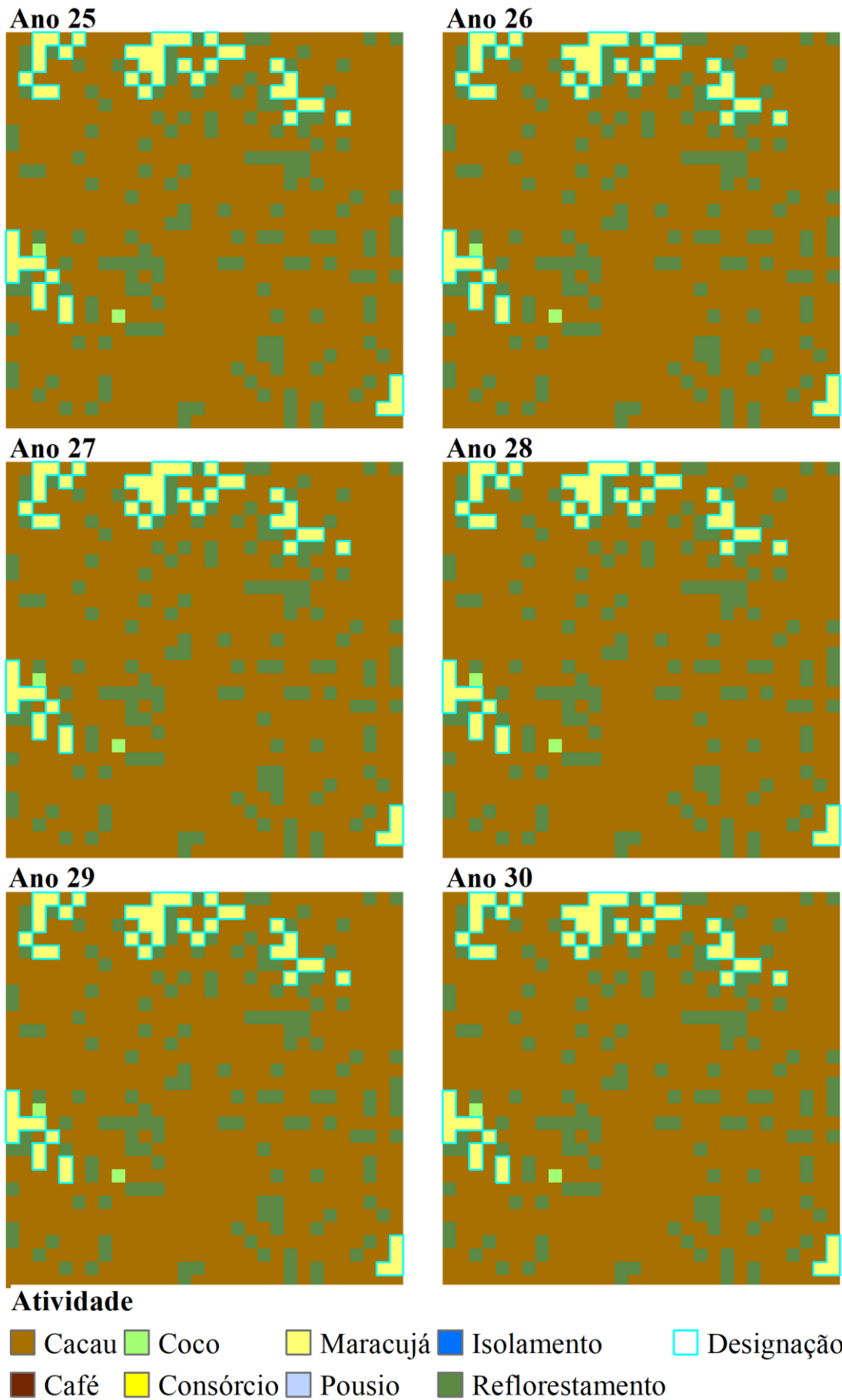


Figura 9. Atividades programadas para a propriedade entre os anos 25 a 30 segundo o modelo proposto.

Observa-se que o modelo pode ser útil na transição da produção, o que é verificado através da substituição de cultivos de café por cultivos de maracujá e cacau até o ano 5 do horizonte de planejamento. O mesmo acontece com o cultivo de seringueira consorciada com cacau, que é substituído por monocultivos de cacau no ano 7.

O efeito da utilização conjunta das restrições de produção mínima e máxima pode ser observada na Figura 10. Através da determinação de valores mínimos, 1500 frutos de coco ano⁻¹ (3 ton ano⁻¹), e máximos, 3000@ de cacau ano⁻¹ (45 ton ano⁻¹), é possível gerenciar a produção da propriedade. Além disso, nem todas as atividades foram selecionadas.

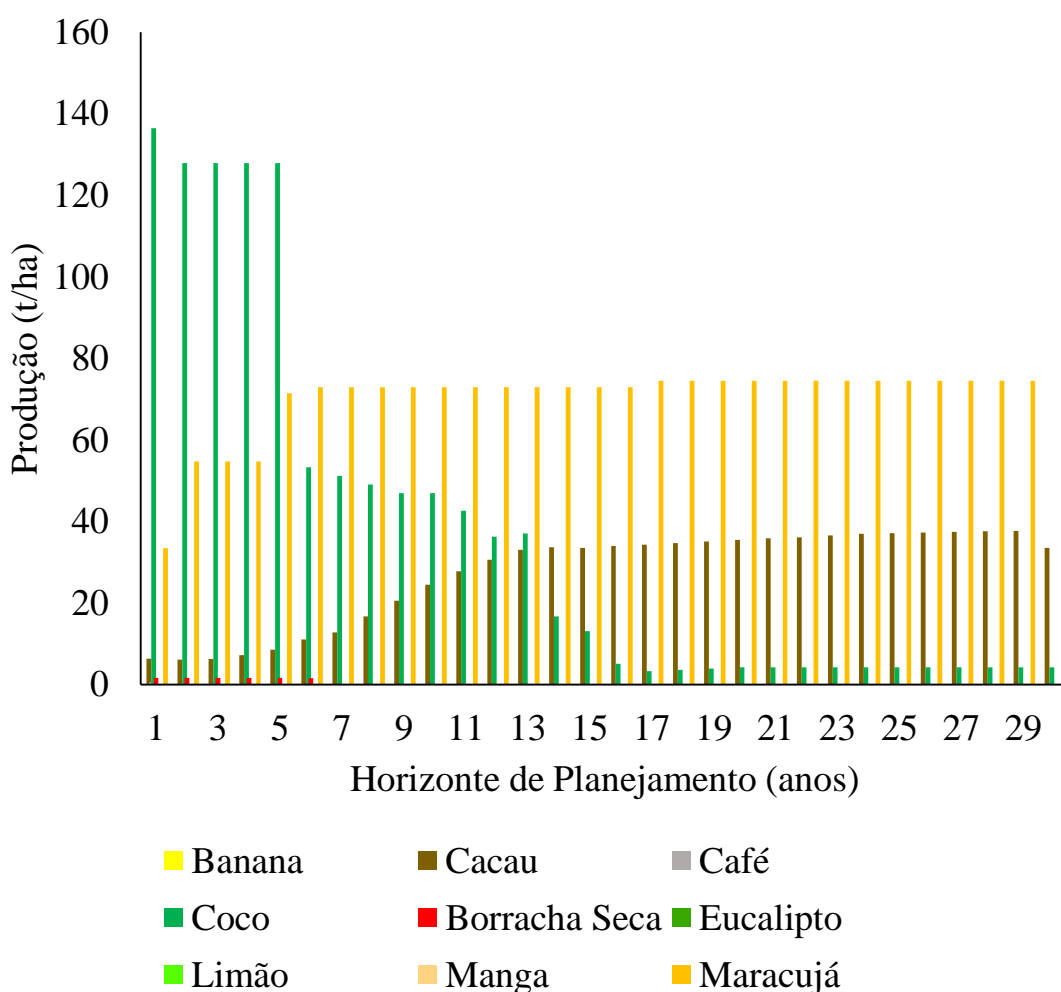


Figura 10. Produção anual da propriedade modelo, considerando a aplicação do modelo de otimização proposto em um o horizonte de planejamento de trinta anos.

De forma similar, pode-se definir vetores de saldo mínimo para o planejamento, e assim gerenciar a propriedade também por saldo.

Para este estudo de caso, foi possível observar que o rendimento do proprietário é sempre positivo ao utilizar o planejamento definido pelo modelo proposto (Figura 11).

No entanto, caso esta não seja uma necessidade, a restrição de saldo mínimo (Eq. 5), pode ser utilizada para definir o máximo valor negativo de cada ano, ou seja, a máxima dívida permitida.

Finalmente, o valor presente líquido das atividades executadas ao longo do planejamento foi de, aproximadamente, R\$ 3 milhões, o que equivale a um valor anual equivalente aproximado de R\$ 245,000 (Figura 11).

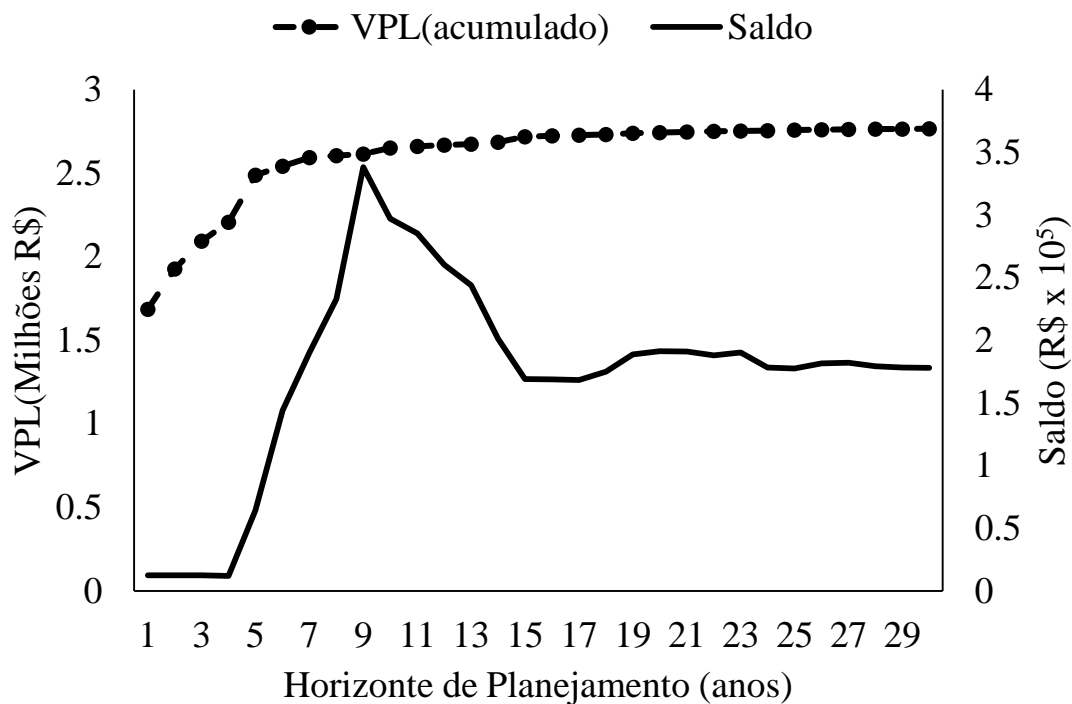


Figura 11. Valor presente líquido acumulado e saldos ao longo dos trinta anos do horizonte de planejamento.

5. Conclusão

O modelo proposto permite a gestão eficiente da propriedade e a utilização sustentável das unidades de manejo, através da inclusão da capacidade de uso do solo em sua estrutura. Sua aplicação pode, inclusive, reduzir o impacto da produção sob as unidades produtivas.

Independente da existência de políticas de pagamentos por serviços ambientais, a utilização do modelo contribui para a recuperação de áreas destinadas a conservação, ao mesmo tempo em que assegura o saldo positivo nos períodos do horizonte de planejamento.

O modelo auxilia na transição da produção, seja para sua simplificação ou diversificação. Além disso, o mesmo permite o gerenciamento da propriedade através de demandas de produção, saldo ou ambos.

O Sistema de Informação Geográfica permite a inclusão de variáveis espaciais na modelagem, tornando o modelo de otimização mais robusto e realista.

6. Referências

AGRIANUAL. **Anuário da agricultura brasileira**. 21 ed. São Paulo: FNP Consultoria e Comércio, 2016. 516p.

Alfandaria, L.; Plateau, A.; Schepler, X. **A branch-and-price-and-cut approach for sustainable crop rotation planning**. European Journal of Operational Research, Volume 241, Issue 3, p. 872-879. 2015.

Arunkumar, R.; Jothiprakash, V. **Optimal crop plans for a multi-reservoir system having intra-basin water transfer using multi-objective evolutionary algorithms coupled with chaos**. Computers and Electronics in Agriculture, Volume 140, p. 34-47. 2017.

Cid-Garcia, N. M.; Bravo-Lozano, A. G.; Rios-Solis, Y. A. **A crop planning and real-time irrigation method based on site-specific management zones and linear programming**. Computers and Electronics in Agriculture, Volume 107, p. 20-28. 2014.

COTTA, M. K. **Quantificação de biomassa e análise econômica do consórcio seringueira-cacau para geração de créditos de carbono**. 2005. 89f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2005.

Dury, J.; Garcia, F.; Reynaud, A.; Bergez, J. **Cropping-plan decision-making on irrigated crop farms: A spatio-temporal analysis**. European Journal of Agronomy. Volume 50, p. 1-10. 2013.

Dury, J.; Garcia, F.; Reynaud, A.; Therond, O.; Bergez, J.E. **Models to support cropping plan and crop rotation decisions. A review**. Agronomy for Sustainable Development. Volume 32, Issue 2, p. 567–580. 2012.

ESRI. **Environmental Systems Research Institute**. USA, 2015.

Filippi, C.; Mansini, R.; Stevanato, E. **“Mixed integer linear programming models for optimal crop selection”**, Computers and Operations Research, Vol. 81 No. 1, p. 26-39. 2017.

Galán-Martín, Á.; Pozo, C.; Guillén-Gosálbez, G.; Vallejo, A. A.; Esteller, L. J. **Multi-stage linear programming model for optimizing cropping plan decisions under the new Common Agricultural Policy**. Land Use Policy, Volume 48, p. 515-524. 2015.

Gurobi Optimization, Inc. **Gurobi optimizer reference manual**. 2017.

Kusumastuti, R. D.; Donk, D. P.; Teunter, R. **Crop-related harvesting and processing planning: a review**. International Journal of Production Economics, Volume 174, p. 76-92. 2016.

Liu, J.; Li, Y.P.; Huang, G.H.; Zhuang, X.W.; Fu, H.Y. **Assessment of uncertainty effects on crop planning and irrigation water supply using a Monte Carlo simulation based dual-interval stochastic programming method**. Journal of Cleaner Production, Volume 149, p. 945-967. 2017.

López-Mata, E.; Orengo-Valverde, J.J.; Tarjuelo, J.M.; Martínez-Romero, A.; Domínguez, A. **Development of a direct-solution algorithm for determining the optimal crop planning of farms using deficit irrigation**. Agricultural Water Management, Volume 171, p. 173-187. 2016.

Niu, G.; Li, Y.P.; Huang, G.H.; Liu, J.; Fan, Y.R. **Crop planning and water resource allocation for sustainable development of an irrigation region in China under multiple uncertainties**. Agricultural Water Management, Volume 166, p. 53-69. 2016.

Osama, S.; Elkholy, M.; Kansoh, R. M. **Optimization of the cropping pattern in Egypt**. Alexandria Engineering Journal, Volume 56, Issue 4, p. 557-566. 2017.

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

Sarker, R.; Ray, T. **An improved evolutionary algorithm for solving multi-objective crop planning models**. Computers and Electronics in Agriculture, Volume 68, Issue 2, p. 191-199. 2009.

Seyedmohammadi, J.; Sarmadian, F.; Jafarzadeh, A. A. Ghorbani M. A., Shahbazi F. **Application of SAW, TOPSIS and fuzzy TOPSIS models in cultivation priority planning for maize, rapeseed and soybean crops.** Geoderma, Volume 310, p. 178-190. 2018.

Stein, S.; Steinmann, H. **Identifying crop rotation practice by the typification of crop sequence patterns for arable farming systems – A case study from Central Europe.** European Journal of Agronomy, Volume 92, p. 30-40. 2018.

You, P.; Hsieh, Y. **A computational approach for crop production of organic vegetables.** Computers and Electronics in Agriculture, Volume 134, p. 33-42. 2017.

Zhang, C.; Li, M.; Guo, P. **An interval multistage joint-probabilistic chance-constrained programming model with left-hand-side randomness for crop area planning under uncertainty.** Journal of Cleaner Production, Volume 167, p. 1276-1289. 2017.