São José dos Campos - SP
LV SBPO
LV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
São José dos Campos, SP - 6 a 9 de novembro de 2023

Um modelo matemático para o planejamento territorial

Kleber de Santana Souza, Franklina M. B. Toledo
Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação - Universidade de São Paulo (USP)
kleber.souza@usp.br, fran@icmc.usp.br

Mayron César de Oliveira Moreira, Andreza Cristina Beezão Moreira
Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas - Universidade Federal de Lavras (UFLA)
mayron.moreira@ufla.br, andreza.moreira@ufla.br

Luciano Cavalcante de Jesus França
Instituto de Ciências Agrarias - Universidade Federal de Uberlândia (UFU)
luciano.franca@ufu.br

RESUMO

A reforma agrária é uma questão crucial para o Brasil, promove o ordenamento territorial, estabelece a equidade social, o desenvolvimento econômico e a manutenção de áreas tradicionais. No entanto, o planejamento territorial eficiente ainda é um desafio complexo devido a uma variedade de fatores a serem considerados, como tamanho das propriedades, topografia, restrições ambientais, infraestrutura e necessidades sociais. Neste estudo, propomos um modelo matemático de otimização baseado no problema de corte e empacotamento para auxiliar no parcelamento de terrenos beneficiários de projetos de reforma agrária, levando em consideração suas produtividades, dimensões e restrições. Realizamos experimentos com dados reais de projeto de reforma agrária considerando diferentes cenários e conjuntos de lotes. As soluções obtidas permitiram alocá-los com formas regulares atendendo assim às premissas do modelo. O estudo contribui para o avanço da aplicação de técnicas matemáticas para auxiliar nas tomadas de decisões governamentais, promovendo distribuição mais justa e sustentável dos recursos.

PALAVRAS CHAVE. Otimização, Desenvolvimento rural, Ordenamento territorial.
AG&MA – PO na Agricultura e Meio Ambiente, PM-Programação Matemática.

ABSTRACT

Land reform is a crucial issue for Brazil, as it promotes territorial organization, establishes social equity, stimulates economic development, and preserves traditional areas. However, efficient territorial planning remains a complex challenge due to a variety of factors that need to be considered, such as property size, topography, environmental restrictions, infrastructure, and social needs. In this study, we propose a combinatorial optimization mathematical model based on the cutting and packing problem to assist in the subdivision of lands benefiting from land reform projects, taking into account their productivity, dimensions, and constraints. We conducted experiments using real data from a land reform project, considering different scenarios and sets of lots. The obtained solutions allowed for their allocation in regular shapes, thus meeting the model's premises. The study contributes to the advancement of the application of mathematical techniques to assist in governmental decision-making, promoting a fairer and more sustainable distribution of resources.

KEYWORDS. Optimization. Rural development. Territorial planning.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174904
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174904

1. Introdução

Os problemas relacionados ao manejo, uso e ocupação da terra são gargalos de discussões importantes em todo o mundo, pois envolvem aspectos econômicos (como escoamento da produção de alimentos e outros produtos agrosilvipastoris), sociais (geração de trabalho e erradicação da fome) e ambientais (preservação de florestas e biodiversidade em risco de extinção) [Moura et al., 2011; França et al., 2022]. Neste trabalho, tratamos do problema de parcelamento de terrenos disponíveis para reforma agrária em lotes para assentamentos rurais, processo denominado Reforma Agrária e conduzido, no Brasil, pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA). Através de uma série de diretivas, o instituto instrui seus técnicos agrícolas a realizarem o parcelamento territorial seguindo particularidades físicas do solo, assim como características da comunidade a ser beneficiada. Apesar disso, Ferreira Neto et al. [2011a] indicam que os assentamentos delineados pelo INCRA repetidamente sofrem críticas por seguirem a técnica conhecida, popularmente, como "quadrado burro". Nesta, os lotes estabelecidos possuem poucos ângulos e áreas homogêneas, apesar do terreno possuir aptidões agrícolas, relevo e hidrografia distintas.

Ferreira Neto et al. [2011a,b] definiram formalmente o Problema de Organização Territorial em Projetos de Reforma Agrária e Planejamento Ambiental (PROTERRA). Os autores realizaram um estudo de caso com uma adaptação do Algoritmo Genético (AG) aplicado a um assentamento agrícola no estado de Minas Gerais, obtendo uma nova configuração territorial que melhora os critérios de produtividade agrícola em relação ao projeto implantado pelo INCRA. Diferentemente de outros trabalhos que envolvem parcelamento territorial [Borgwardt et al., 2014; Porta et al., 2014, p.e.], o PROTERRA incorpora, ao parcelamento de terras, a questão das Áreas de Preservação Permanente (APP), e distingue lotes que possuem ou não rios. Isso faz com que o PROTERRA se aproxime de abordagens que enquadrem a Reforma Agrária como uma questão social e ambiental. Moreira et al. [2011] apresentam um algoritmo de Busca Tabu (BT) baseado em princípios como simplicidade na estrutura de vizinhança e penalidades dinâmicas como forma de obter soluções viáveis. Mesmo mostrando-se superior ao AG, a BT demanda tempo computacional considerável para gerar toda a vizinhança de uma solução, visto que representa uma solução do problema através de uma matriz.

O trabalho de Gliesch et al. [2017] é, ao que consta, o estado da arte para o PROTERRA. Os autores representam o terreno por células quadriculadas e propõem uma estrutura de dados que armazena apenas as bordas de cada lote, representando-as através de uma lista duplamente encadeada. Assim, as trocas de células entre lotes são feitas de maneira mais eficiente, propiciando um melhor desempenho de operadores de busca local. Um conjunto de soluções iniciais é criado a partir de um algoritmo construtivo baseado na ideia de *"location-allocation"* [Kalcsics et al., 2005]. Assim como no algoritmo *K-Means* [Hartigan et al., 1979], os centroides de cada lote são recalculados, para que haja uma expansão mais compacta de células. As soluções são evoluídas a partir de um algoritmo genético que utiliza operadores de cruzamento que preservam parte das posições relativas dos lotes, a partir da resolução de um problema de emparelhamento máximo ponderado. Já o operador de mutação torna uma quantidade de células das bordas dos lotes como não-designadas, e utiliza o algoritmo construtivo para completá-las. Em seus experimentos computacionais, os autores utilizaram 5 instâncias reais com dados do INCRA e propuseram um conjunto de 25 instâncias artificiais, com o objetivo de analisar a escalabilidade de seu algoritmo. Os testes mostram que o algoritmo genético em questão aprimora todas as abordagens já vistas para o PROTERRA.

Apesar dos avanços com relação ao desenvolvimento de algoritmos para o PROTERRA, as soluções propostas possuem como fraqueza a criação de lotes com muitos ângulos. Mesmo que os lotes tenham mais homogeneidade quanto à aptidão agrícola, a demasiada quantidade de

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174904
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174904

arestas pode deixar o parcelamento caro ou inviável, do ponto de vista técnico e prático. Nossa proposta visa sanar essa dificuldade, ao oferecer aos técnicos agrícolas uma solução que proponha um parcelamento viável e que, ainda assim, englobe fatores produtivos, ambientais e econômicos quanto à redução do número de arestas. Tal solução considera as seguintes características:

- Aspecto estético e funcional da propriedade. Esses fatores promovem a valorização econômica e facilitam a implementação da infraestrutura necessária para as atividades produtivas e de ocupação, como a construção de estradas e a eletrificação rural.
- Proposição de lotes que, quando comparados, gerem desvios padrão mínimos com relação aos valores de aptidão de suas áreas. Isso leva a um parcelamento com condições mais igualitárias para obtenção de resultados relacionados ao cultivo da terra.
- Não sobreposição entre lotes e barreiras naturais, que, em nosso contexto, são os cursos d'água, atendendo ao aspecto legal quanto à proteção das margens de cursos hídricos pela legislação ambiental.

A principal contribuição deste estudo consiste em buscar a resolução do problema visando atender as três características destacadas. Para tanto, representamos o terreno como uma placa retangular que deve ser dividida em lotes também retangulares, e modelamos matematicamente este problema como um problema de corte e empacotamento bidimensional.

O restante do documento está organizado da seguinte forma. Na Seção 2, apresentamos a definição formal e a modelagem matemática do PROTERRA como um problema de corte e empacotamento de peças regulares. Na Seção 3, reportamos os experimentos computacionais, em que a abordagem proposta é analisada utilizando instâncias artificiais e reais. Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros são indicadas na Seção 4.

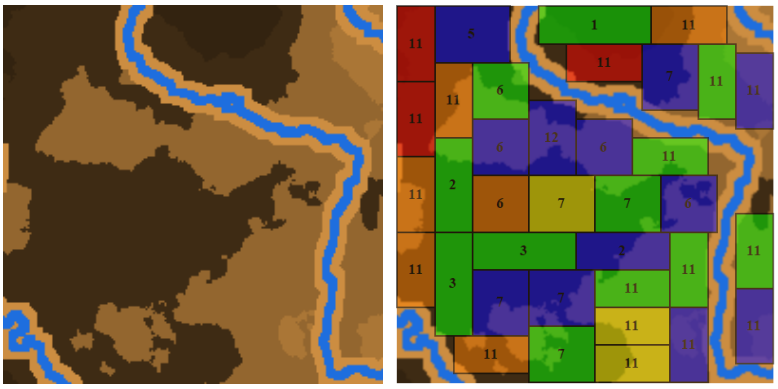
2. Definição e Modelagem do Problema

Neste trabalho, abordamos o Problema de Organização Territorial em Projetos de Reforma Agrária e Planejamento Ambiental (PROTERRA). A ideia central do PROTERRA é dada uma área disponível para reforma agrária, dividi-la em lotes para assentamentos rurais. Na Figura 1, ilustramos um exemplo de um terreno e alguns lotes nele posicionados. Os números nos retângulos indicam qual lote foi alocado, podendo este estar rotacionado em 90º, e sua cor indica a qual faixa de produtividade tal lote pertence. Foram criadas cinco faixas de produtividade que, em ordem crescente, são representadas respectivamente pelas cores vermelha, laranja, amarela, verde e azul. No gráfico da Figura 2, mostramos os valores para as respectivas faixas de produtividade do exemplo apresentado na Figura 1.

O problema estudado foi representado como um problema de corte e empacotamento de itens retangulares bidimensional. Mais especificamente, lotes de diferentes tamanhos são representados por retângulos que devem ser dispostos numa área disponível para reforma agrária que, por sua vez, é representada como um objeto retangular, ao qual chamamos de terreno. Os lados dos lotes são paralelos ao terreno e a orientação dos lotes é fixa.

Neste trabalho, utilizamos o modelo bidimensional de corte não-guilhotinado de Beasley [1985] para tratar o problema. Este é um modelo que considera o posicionamento discreto dos retângulos (lotes), ou seja, eles podem ser posicionados no objeto (terreno) em alguns pontos específicos. O terreno é representado por uma grade de pontos e cada lote é posicionado considerando

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174904
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174904



(a) Terreno. (b) Lotes posicionados.

Figura 1: Exemplo de representação do problema estudado.

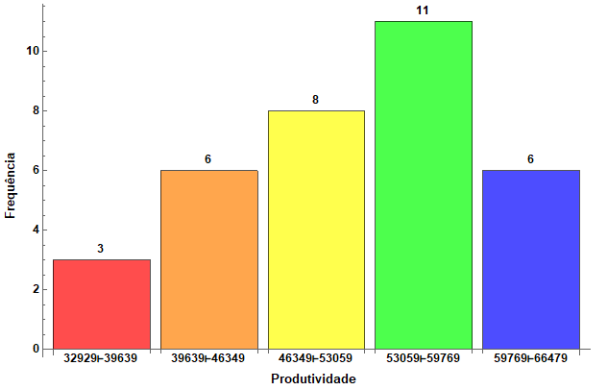


Figura 2: Faixas de produtividade para o exemplo da Figura 1.

seu ponto de referência (seu vértice inferior esquerdo), de forma que os lotes estejam completamente dentro do terreno e não se sobreponham.

Consideramos uma grade de pontos regular para retratar o terreno, que é definida utilizando um passo s pré-estabelecido. Mais especificamente, os conjuntos de pontos da grade que representam o terreno nos eixos horizontal e vertical são dados por:

$$L_0 = \{p \mid p = ks,\ 0 \leqslant p \leqslant l_0 - \min\{l_i \mid i = 1, \ldots, m\}, k \in \mathbb{Z}_+\};$$

$$W_0 = \{q \mid q = ks,\ 0 \leqslant q \leqslant w_0 - \min\{w_i \mid i = 1, \ldots, m\}, k \in \mathbb{Z}_+\};$$

em que:

m é o número de tipos de lotes disponíveis;
l_i é o comprimento do lote i;
l_0 é o comprimento do terreno;
w_i é a largura do lote i e
w_0 é a largura do terreno.

O problema é descrito pelo modelo matemático (1)–(6). Seus parâmetros e variáveis são descritos

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174904
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174904

na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros e variáveis do modelo (1)–(6).

v_i	é a área do lote i ($v_i = l_i w_i$);
k_{ipq}	é o valor de produtividade de um lote do tipo i quando posicionado no ponto (p, q);
L_i	é o conjunto de coordenadas p no eixo horizontal em que um lote do tipo i pode ser posicionado, ou seja, $L_i = \{p \in L_0 \mid 0 \leqslant p \leqslant l_0 - l_i\}$;
W_i	é o conjunto de coordenadas q no eixo vertical em que um lote do tipo i pode ser posicionado, ou seja, $W_i = \{q \in W_0 \mid 0 \leqslant q \leqslant w_0 - w_i\}$.
T	é um limitante inferior de produtividade (igual a produtividade do menor lote considerando a menor classe de aptidão);
x_{ipq}	é uma variável binária que assume o valor 1 se o canto inferior esquerdo de um lote do tipo i é posicionado no ponto (p, q), e assume o valor 0 caso contrário;
z	variável continua que representa o valor do lote mais valioso alocado no terreno, ou seja, o que tem maior produtividade.

$$\text{Max} \sum_{i=1}^{m} \sum_{p \in L_i} \sum_{q \in W_i} v_i x_{ipq} - \alpha z \tag{1}$$

sujeito a

$$\sum_{i=1}^{m} \sum_{\{p \in L_i \mid r - l_i + 1 \leqslant p \leqslant r\}} \sum_{\{q \in W_i \mid s - w_i + 1 \leqslant q \leqslant t\}} x_{ipq} \leqslant 1 \qquad r \in L_0,\ t \in W_0 \tag{2}$$

$$k_{ipq} x_{ipq} - T x_{ipq} \geqslant 0 \qquad i = 1, \ldots, m,\ p \in L_i,\ q \in W_i \tag{3}$$

$$z - k_{ipq} x_{ipq} \geqslant 0 \qquad i = 1, \ldots, m,\ p \in L_i,\ q \in W_i \tag{4}$$

$$x_{ipq} \in \{0, 1\} \qquad i = 1, \ldots, m,\ p \in L_i,\ q \in W_i \tag{5}$$

$$z \geqslant 0 \tag{6}$$

A função objetivo (1) visa maximizar a área total alocada do terreno. A minimização da diferença entre a produtividade de diferentes lotes é um objetivo secundário no modelo proposto, por isso a subtração do termo αz, em que α é um peso ajustável e z é a maior produtividade dentre os lotes posicionados. As restrições (2) asseguram que não sejam alocados lotes de forma sobreposta, ou seja, um lote é totalmente independente do outro. As restrições (3) garantem que cada lote seja alocado a uma posição em que um valor mínimo de produtividade seja assegurado. A variável z é definida pelas restrições (4) e o domínio das variáveis é definido em (5) e (6).

3. Experimentos computacionais

Nesta seção, reportamos os experimentos computacionais conduzidos para avaliar a efetividade de abordar o problema de parcelamento territorial do PROTERRA como um problema bidimensional de corte não-guilhotinado.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174904
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174904

3.1. Instâncias utilizadas

A contextualização do parcelamento territorial em projetos de reforma agrária torna importante o uso de instâncias reais. Utilizamos, portanto, dois assentamentos rurais (terrenos): (i) Veredas, na mesorregião do Jequitinhonha, em Minas Gerais e (ii) Fortaleza, no Tocantins. Todas as informações relativas a estes terrenos foram retiradas da base pública do INCRA e organizadas no trabalho de Ferreira [2015]. Utilizamos, também, duas instâncias artificiais: (i) 200x200k100s45221 e (ii) 300x300k20s94113, ambas descritas em Gliesch et al. [2017].

3.2. Geração dos lotes

Os lotes retangulares foram criados usando três estratégias. Na primeira, foram gerados lotes retangulares, tendo como base três fatores: (i) a área útil do terreno, (ii) o passo s utilizado para definir a grade que representa o terreno, e (iii) o número médio n de lotes que devem ser alocados no terreno. Na segunda, foram gerados lotes retangulares combinando, de forma aleatória, os valores obtidos de comprimento e largura dos lotes da primeira estratégia. A terceira consiste na combinação dos lotes obtidos nas estratégias anteriores. Alguns detalhes são dados a seguir.

Lotes Retangulares - Estratégia 1

Tomamos como base o número médio n de lotes que se pretende alocar e definimos a área média dos lotes como:

$$A_m = \left\lfloor \frac{área\ útil}{n} \right\rfloor,$$

a qual é utilizada como referência para definir a largura e o comprimento dos lotes. Consideramos três lotes iniciais: R_1, R_2 e R_3. Dado o passo s que define a grade do terreno, tanto a largura quanto o comprimento de um lote devem ser definidos de forma a se encaixarem na grade, ou seja, consideramos $l = \beta s$ e $w = \gamma s$. Para R_1, R_2 e R_3, utilizamos $\beta \in \{4, 6, 8\}$ e, como $A_m = \beta s \times \gamma s$, o valor de w_i é dado por:

$$w_i = \left\lfloor \frac{A_m}{l_i \cdot s} \right\rfloor s, \quad i = 1, 2, 3.$$

A partir dos três lotes iniciais, definimos novos lotes mantendo fixas as larguras l_1, l_2 e l_3 e variando os comprimentos. Criamos lotes com comprimentos maiores $w_1 + s$, $w_1 + 2s$, $w_2 + s$, $w_2 + 2s$, $w_3 + s$ e $w_3 + 2s$ e lotes com comprimentos menores $w_1 - s$, $w_1 - 2s$, $w_2 - s$, $w_2 - 2s$, $w_3 - s$ e $w_3 - 2s$, eliminando aqueles cuja razão entre menor e maior lado seja menor que $0,3$, de forma a evitarmos lotes com forma muito alongada.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174904
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174904

Lotes Retangulares - Estratégia 2

Criamos um conjunto contendo os valores obtidos na estratégia anterior e geramos 15 lotes combinando, de forma aleatória, os valores de comprimento e de largura deste conjunto. Os lotes duplicados ou com razão entre o menor e o maior lado menor que $0,3$ são descartados.

Exemplo Ilustrativo

Considerando um terreno com área útil de 37.759 m^2, uma grade com passo $s = 5$ e alocação de aproximadamente 30 lotes ($n = 30$), temos:

$$A_m = \left\lfloor \frac{37759}{30} \right\rfloor = 1258$$

$$l_1 = 4 \times 5 = 20 \qquad w_1 = \left\lfloor \frac{1258}{20 \times 5} \right\rfloor \times 5 = 60$$

$$l_2 = 6 \times 5 = 30 \qquad w_2 = \left\lfloor \frac{1258}{30 \times 5} \right\rfloor \times 5 = 40$$

$$l_3 = 8 \times 5 = 40 \qquad w_3 = \left\lfloor \frac{1258}{40 \times 5} \right\rfloor \times 5 = 30$$

resultando no Conjunto 1 de lotes, cujos valores aparecem na Tabela 2. Os dois outros conjuntos de lotes (Conjunto 2 e Conjunto 3) foram obtidos combinando de forma aleatória os valores de comprimento e largura da primeira estratégia, ou seja, combinando elementos do conjunto $\{20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65\}$. O Conjunto 4 é dado pela união destes três conjuntos.

Tabela 2: Exemplos de lotes retangulares - Conjuntos 1, 2 e 3.

Lote	Conjunto 1		Conjunto 2		Conjunto 3	
	w_i	l_i	w_i	l_i	w_i	l_i
1	20	60	55	30	30	60
2	20	50	45	20	25	65
3	20	55	30	50	50	25
4	20	65	35	45	65	65
5	30	40	30	60	20	55
6	30	30	20	55	45	25
7	30	35	65	20	60	50
8	30	45	65	50	20	30
9	30	50	35	65	60	45
10	40	30	55	55	40	30
11	40	20	50	40	45	45
12	40	25	45	40	35	30
13	40	35	65	45	20	35
14	40	40	25	50	-	-

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174904
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174904

3.3. Testes Computacionais

Todos os testes foram executados em um computador com Processador AMD Ryzen 5 3500U, com Radeon Vega Mobile Gfx de 2.10 GHz, RAM instalada 12,0 GB (utilizável: 9,88 GB) e Sistema operacional Windows 11 Home, Versão 22H2 de 64 bits. Utilizamos a linguagem de programação Julia na versão 1.8.3, descrevemos o modelo utilizando o pacote para otimização JuMP na versão v1.11.0 e resolvemos as instâncias utilizando o software de otimização Gurobi na versão 9.5.0.

Os testes computacionais foram realizados considerando as quatro instâncias descritas na Seção 3.1. Para cada instância, foram gerados quatro conjuntos de lotes, como descrito na Seção 3.2. O número de lotes desejado para cada instância foi fixado em 30 e a máxima produtividade (z) foi utilizada apenas como fator de desempate com relação à cobertura do terreno, ou seja, consideramos $\alpha = 0,05$.

Na Tabela 3, resumimos os resultados obtidos para as quatro instâncias avaliadas. Na primeira e segunda colunas da tabela, apontamos a instância e o conjunto de lotes utilizados, respectivamente. Em seguida, nas colunas três e quatro, a quantidade de lotes que foram alocados (Nº lotes) e o percentual de cobertura alcançado para o terreno são reportados (Cobertura %). Por fim, nas colunas cinco e seis, os dados obtidos em relação a produtividade, que são respectivamente, o coeficiente de variação (c.v.) e a razão entre máxima e mínima produtividade dos lotes (max/min) são disponibilizados.

Tabela 3: Resultados obtidos para as quatro instâncias avaliadas.

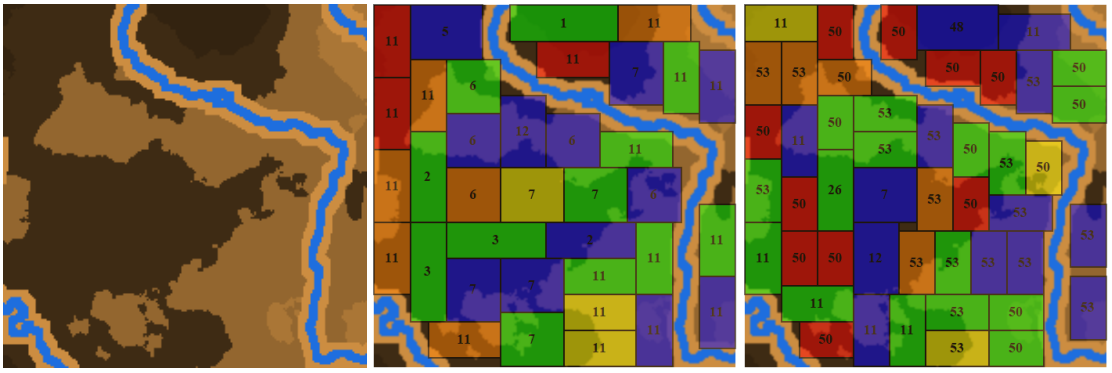
				Produtividade	
Instância	Conj. lotes	Nº Lotes	Cobertura (%)	c.v. (%)	max / min
200x200k100s45221	1	36	86,9	**12,5**	**1,6**
	2	29	84,8	15,2	1,8
	3	49	87,5	16,2	1,8
	4	47	**87,6**	17,0	1,8
300x300k20s94113	1	27	86,1	**19,1**	**1,9**
	2	29	82,6	21,1	**1,9**
	3	44	86,1	21,0	2,0
	4	45	**86,8**	22,6	2,2
Veredas	1	26	67,4	**19,7**	**2,0**
	2	19	60,9	28,5	3,2
	3	38	70,8	26,9	3,1
	4	36	**72,3**	21,9	**2,0**
Fortaleza	1	25	70,6	14,0	1,7
	2	23	66,5	16,3	1,6
	3	41	71,9	**9,1**	**1,4**
	4	36	**74,1**	19,7	1,7

Como podemos observar, a escolha dos lotes influencia na cobertura do terreno. Considerando os lotes gerados aleatoriamente, como esperado, obtemos resultados variados (Conjuntos de Lotes 2 e 3). O Conjunto de Lotes 1 é mais estável, apontando uma cobertura próxima ao melhor resultado com um número de lotes próximo ao desejado (30). O coeficiente de variação e a razão

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174904
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174904

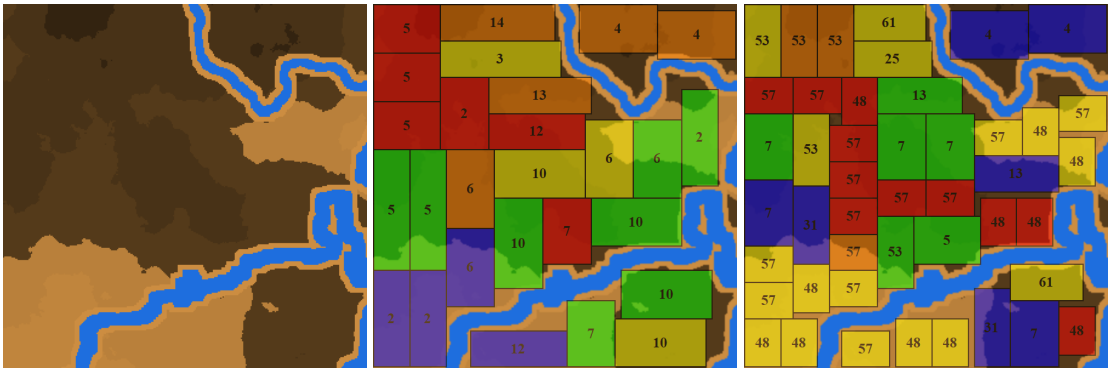
entre a maior e menor produtividade para o Conjunto de Lotes 1 são menores para a maioria das instâncias, com exceção apenas da instância Fortaleza). Como esperado, com um maior número de lotes (Conjunto 4) é possível obter uma maior área de cobertura, no entanto, o número de lotes se afasta bastante em relação ao número desejado de 30 lotes.

Nas Figuras 3 a 6, ilustramos as alocações dos lotes dos Conjuntos 1 e 4 para as quatro instâncias mencionadas.



(a) Instância. (b) Conjunto de lotes 1. (c) Conjunto de lotes 4.

Figura 3: Soluções para instância 200x200k100s45221.



(a) Instância. (b) Conjunto de lotes 1. (c) Conjunto de lotes 4.

Figura 4: Soluções para instância 300x300k20s94113.

4. Conclusões e perspectivas futuras

Neste trabalho, abordamos o Problema de Organização Territorial em Projetos de Reforma Agrária e Planejamento Ambiental (PROTERRA). Mais especificamente, tratamos do parcelamento de áreas disponíveis para reforma agrária (terrenos) em lotes para assentamentos rurais. Consideramos lotes que visam atingir três objetivos principais: (i) atender aos aspectos estético e funcional das propriedades; (ii) ter valores de produtividade próximos; e (iii) não devem sobrepor barreiras naturais.

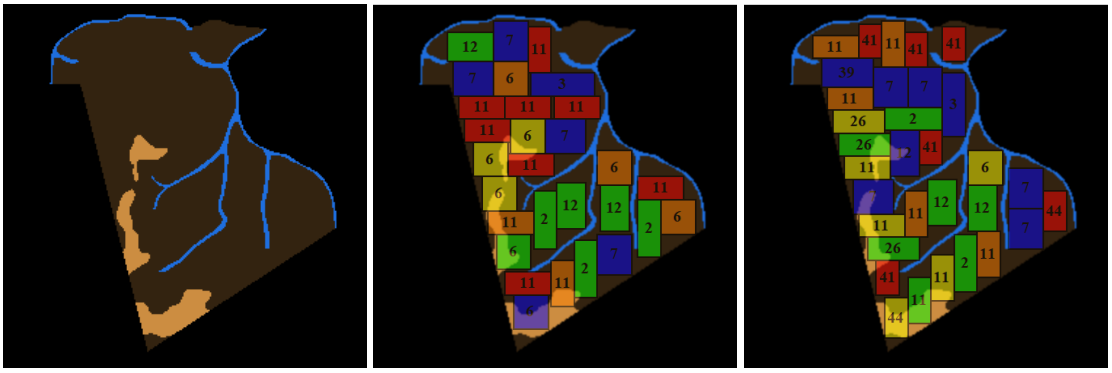
Representamos o problema estudado como um problema de cortes e empacotamento bidimensional. O terreno foi representado por uma malha regular em que lotes retangulares de dife-

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174904
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174904



(a) Instância Veredas. (b) Conjunto de lotes 1. (c) Conjunto de lotes 4.

Figura 5: Soluções para instância Veredas.



(a) Instância Fortaleza. (b) Conjunto de lotes 1. (c) Conjunto de lotes 4.

Figura 6: Soluções para a instância Fortaleza.

rentes tamanhos podem ser alocados (empacotados). Este problema é conhecido na literatura como problema de corte bidimensional não-guilhotinado.

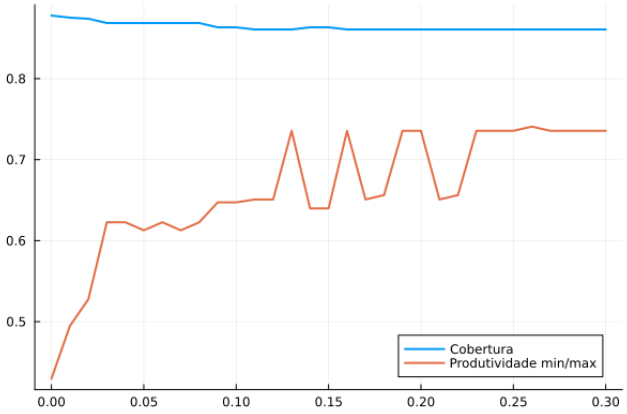
De uma forma geral, os principais objetivos foram alcançados. As soluções obtidas permitiram alocar os lotes com formas regulares, não temos sobreposição com cursos d'água (ver Figuras 3 a 6) e obtivemos uma baixa dispersão de produtividade dos lotes em torno da média, o que pode ser verificado pelos valores do coeficiente de variação, principalmente no Conjunto de Lote 1, para todas as instâncias testadas (ver Tabela 3). Como esperado, a cobertura do terreno utilizando formas retangulares não atinge 100% da área produtiva presente nas instâncias utilizadas, mas esta dificuldade pode ser ultrapassada numa fase de melhoria da solução (pós-otimização).

A distância entre os valores máximo e mínimo de produtividade foram satisfatórios. No entanto, esta distância pode ser melhorada se alterarmos o valor do parâmetro α presente na função objetivo que, a princípio, foi usado como $\alpha = 0,05$. No gráfico da Figura 7, ilustramos o efeito da variação do parâmetro α para a Instância 1 utilizando o Conjunto de Lotes 1. Podemos observar uma tendência na diminuição da distância entre os valores máximo e mínimo de produtividade, com uma pequena redução no percentual da área de cobertura a medida que aumentamos os valores de α.

Em resumo, como trabalhos futuros atuaremos em três frentes que julgamos necessárias

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174904
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174904

para a melhoria das soluções. A primeira consiste em elaborar uma heurística de melhoria para buscarmos alcançar 100% de cobertura dos terrenos. Vale destacar, que devemos manter ou melhorar a dispersão em torno da média de produtividade dos lotes já alcançada. Como pudemos observar, a definição dos lotes disponíveis para a resolução do problema influencia na qualidade de sua solução, logo, na segunda frente, pretendemos testar outras formas para obtenção dos conjuntos de lotes. Por fim, como o problema estudado tem objetivos contraditórios, como percentual de cobertura da instância e diminuição da dispersão em torno da média de produtividade, uma frente de continuidade deste trabalho é abordá-lo utilizando otimização multiobjetivo para obtermos soluções eficientes que permitam ao gestor escolher a mais apropriada para cada terreno.



Instância 1 - Conjunto de Lotes 1

Figura 7: Análise da cobertura e da distância entre os valores máximo e mínimo de produtividade de acordo com a variação do parâmetro α.

Agradecimentos

Esta pesquisa contou com o apoio e financiamento da CAPES (Proex 88887.658565/2021-00), do CNPq (420348/2016-6 e 309161/2022-3), FAPEMIG (projeto TEC-APQ-02694-16) e da FAPESP (2013/07375-0 CEPID-CeMEAI). Os autores ainda agradecem o apoio técnico da Fundação de Desenvolvimento Científico e Cultural (FUNDECC/UFLA), ao Laboratório de Otimização ICMC/USP (LOt), a Universidade Federal de Lavras e a Universidade de São Paulo.

Referências

Beasley, J. E. (1985). An exact two-dimensional non-guillotine cutting tree search procedure. *Operations Research*, 33(1):49–64.

Borgwardt, S., Brieden, A., e Gritzmann, P. (2014). Geometric clustering for the consolidation of farmland and woodland. *Mathematical Intelligencer*, 36:37–44.

Ferreira, F. M. (2015). Aptidão agrícola das terras como função de otimização para o ordenamento territorial e planejamento ambiental: uma análise do soter-pa. Master's thesis, Universidade Federal de Viçosa.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174904
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174904

Ferreira Neto, J. A., Moreira, M. C. O., Santos Junior, E. C., Paleo, U. F., e Lani, J. L. (2011a). Aptidão agrícola e algoritmos genéticos na organização espacial em projetos de reforma agrária. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35:255–261.

Ferreira Neto, J. A., Santos Junior, E. C., Paleo, U. F., Barros, D., e Moreira, M. C. O. (2011b). Optimal subdivision of land in agrarian reform projects: an analysis using genetic algorithms. *Ciencia e Investigación Agraria*, 38:169–178.

França, L. C. J., Acerbi Júnior, F. W. A., Silva, C. S. J., Monti, C. A. U., Ferreira, T. C., Santana, C. J. O., e Gomide, L. R. G. (2022). Forest landscape planning and management: A state-of-the-art review. *Trees, Forests and People*, 8:1–18.

Gliesch, A., Ritt, M., e Moreira, M. C. (2017). A genetic algorithm for fair land allocation. In *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, p. 793–800.

Hartigan, J. A., Wong, M. A., et al. (1979). A k-means clustering algorithm. *Applied statistics*, 28 (1):100–108.

Kalcsics, J., Nickel, S., e Schröder, M. (2005). Towards a unified territorial design approach—applications, algorithms and gis integration. *TOP*, 13:1–56.

Moreira, M., Ferreira Neto, J., Einloft, C. J., e Silva, N. T. C. (2011). O uso da busca tabu no ordenamento territorial em assentamentos rurais: reconfigurando o SOTER-PA (Sistema de Organização Territorial da Reforma Agrária e Planejamento Ambiental). In Ferreira Neto, J. A., Einloft, C. J., e Gonçalves, R. L., editors, *Desenvolvimento rural, sustentabilidade e ordenamento territorial*, volume 1, p. 265–273. Suprema, Visconde do Rio Branco.

Moura, R. A., Ferreira Neto, J. A., Doula, S. M., e Lani, J. L. (2011). Reforma agrária e desenvolvimento: a reconstrução de uma questão polêmica. *Revista UNIARA*, 14:95.

Porta, J., Parapar, J., Doallo, R., Barbosa, V., Santé, I., Crecente, R., e Díaz, C. (2014). A population-based iterated greedy algorithm for the delimitation and zoning of rural settlements. *Computers, Environment and Urban Systems*, 39:12–26.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174904
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174904