

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ESTATÍSTICA E INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL



## **MODELOS MATEMÁTICOS DE APOIO AO CORTE E TRANSPORTE DE MADEIRA EM FLORESTAS**

Ana Catarina Granado Rebelo dos Santos

**Mestrado em Matemática Aplicada à Economia e à Gestão**

Trabalho de Projeto orientado por:  
Prof. Doutor Miguel Fragoso Constantino  
Prof. Doutora Marta Mesquita de Oliveira

2021

:



## AGRADECIMENTOS

*Se queres ir rápido, vai sozinho.  
Se queres ir longe, vai acompanhado.  
(Provérbio africano)*

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais por tudo o que me proporcionaram ao longo da vida, por me apoiarem sempre nas minhas decisões e indecisões, nas minhas vitórias e nas minhas derrotas, por acreditarem em mim e me apoiaram ao longo deste extenso processo. À minha família, com especial destaque para as minhas avós, pelo carinho constante e pelas palavras de motivação.

Ao Vasco, pelo seu amor, carinho e paciência nos momentos mais difíceis.

Aos amigos que me acompanharam ao longo deste percurso. Obrigada pelo companheirismo e amizade; pelos bons momentos, pelo apoio e partilha de experiências. Um especial agradecimento às grandes amigas que conheci neste mestrado, nomeadamente, Sara Graça, Ana Sofia, Ana Marta Figueira e Sara Calado, que me ajudaram e acompanharam sempre nos bons e maus momentos e com as quais muito aprendi. A todos os amigos que me incentivaram ao longo de todo o processo.

Quero deixar aqui um forte agradecimento ao professor Miguel Constantino, na qualidade de meu orientador, pela sua dedicação, generosidade, disponibilidade, na realização do presente relatório. É, sem dúvida, uma grande honra a possibilidade de elaborar uma dissertação de final de mestrado com a sua orientação. Quero agradecer à professora Marta Mesquita de Oliveira, pela leitura cuidada e orientação na concretização deste trabalho.

Ao Projeto *BioEcosys* (lisboa-01-0145-feder-030391), que permitiu a realização deste estudo, fornecendo os dados necessários para a concretização do mesmo.

Agradeço ainda aos meus colegas dos Salesianos de Manique, pelo apoio e carinho ao longo destes quatro anos. Foi um percurso longo e exigente, em que nem sempre foi fácil conciliar as tarefas, mas a compreensão e preocupação demonstrada permitiram que conseguisse superar todos os obstáculos.

Por fim, gostaria ainda de agradecer a todos os professores que tanto me motivaram e inspiraram ao longo deste processo e com quem tanto aprendi.

## RESUMO

Este estudo baseia-se num problema de gestão florestal que integra a análise da gestão da madeira e da construção e manutenção de estradas, para o qual é necessário definir as prescrições a aplicar (tratamento, desbaste, cortes) ao longo de um período, incluindo a calendarização das operações, bem como o transporte da madeira para o exterior. Foi desenvolvido um modelo de programação linear inteira mista para obter soluções em que o objetivo é minimizar custos e maximizar a receita obtida da venda da madeira.

Os custos da construção e manutenção de estradas e carregamento e transporte da madeira são conhecidos. A madeira é carregada e transportada para o exterior da floresta através de camiões que viajam ao longo das estradas florestais. Um segmento de estrada existe num período apenas se tiver sido construído nesse período ou se já existia no período anterior e foi mantida.

Para este problema, são considerados dois modelos: o modelo integrado considera as decisões sobre prescrições e remoção da madeira, de acordo com o problema descrito; o modelo sequencial toma duas decisões de forma separada – primeiro decide sobre as melhores prescrições para maximizar o valor atual líquido, e depois considera as decisões sobre a construção e manutenção de estradas, carregamento e transporte de madeira.

Esta metodologia foi programada num solver (FICO® Xpress Optimization) e foi aplicada em várias instâncias.

As soluções obtidas pelo modelo de programação linear inteira mista são organizadas em diferentes tabelas, de acordo com o propósito da análise. O objetivo principal é compreender qual o modelo mais adequado em cada caso, de acordo com os valores obtidos, nomeadamente: valor total, valor atual líquido, custos de construção e de manutenção de estradas, *gap* e tempo de processamento do modelo.

**Palavras-chave:** gestão florestal, modelos operacionais, programação linear inteira mista, estradas florestais, unidades de gestão.

## ABSTRACT

This study deals with the forest management problem of integrating the analysis of timber management and forest road building and maintenance, for which we have to decide on the prescriptions to apply (treatment, thinning, clearcuts) over a time horizon, including harvest scheduling, and also taking the timber out of the forest. A mixed integer linear programming model is developed to obtain solutions where the objective is to minimize costs and maximize revenue from the sale of timber.

Costs are known for road building and maintaining, for timber loading and transportation. Timber is loaded and carried out of the forest by trucks that travel along forest roads built. A road segment exists in a period only if it is built in that period or if it existed in a previous period and is maintained.

For this problem, we consider two models: integrated model considers decisions on prescriptions and removal of timber, accordingly to the problem described; sequential model takes decisions separately - first the best prescriptions are chosen to maximize net present value, and then considers road building and maintenance, timber loading and transportation decisions.

This methodology was programmed into a solver (FICO® Xpress Optimization) and it is applied in several instances.

The solutions obtain by using integer linear programming models are organized in different charts, according to the purpose of the analysis. The main goal is to understand which model is the most suitable in each case, according to the values obtained, namely: total value; net present value; road building and maintenance and transportation cost; gap and running time.

**Keywords:** forest management, integer linear programming, operational models, forest roads, stands.

# ÍNDICE GERAL

Índice de Figuras.....	v
Índice de tabelas .....	vi
Lista de abreviaturas, siglas .....	vii
Introdução .....	1
1. Revisão da Literatura.....	2
1.1. Modelos de planejamento estratégico e tático em florestas .....	3
1.2. Modelos de planejamento operacional em florestas.....	4
1.3. Corte e colheita de madeira .....	6
1.4. Construção de estradas e transporte de madeira.....	8
1.4.1. Planejamento da rede de estradas .....	9
1.4.2. Transporte de madeira e melhoramento de estradas .....	12
1.5. Localização de equipamento.....	15
2. Caso de Estudo .....	19
2.1. Área em estudo.....	19
2.2. Descrição do problema .....	20
2.3. Objetivos do estudo .....	21
3. Metodologia.....	23
3.1. Modelos .....	24
3.2. Indicadores dos modelos .....	29
3.3. Exemplos Ilustrativos .....	32
3.4. Instâncias.....	33
4. Obtenção e análise de resultados.....	36
5. Conclusão .....	45
6. Referências Bibliográficas .....	47
7. Anexos .....	50
Anexo 1. - Mapas das florestas F10, F28A, F28B e F44 .....	51
Anexo 2. – Resultados da instância <b>F10<sub>i j</sub></b> .....	53
Anexo 3. – Resultados da instância <b>F28A<sub>i j</sub></b> .....	59
Anexo 4. – Resultados da instância <b>F28B<sub>i j</sub></b> .....	65
Anexo 5. – Resultados da instância <b>F44<sub>i j</sub></b> .....	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Níveis de planeamento florestal. Henningsson, Karlsson & Rönnqvist (2007).....	2
Figura 2 - Uma rede que inclui seis áreas de colheita, uma travessia, dois nodos de passagem (quadrados) e uma fábrica. Karlsson, Rönnqvist and Frisk (2006) .....	14
Figura 3 - Feller-buncher de esteira (esquerda) e harvester (direita). Schiess and Krogstad 2007 .....	15
Figura 4 - clambunk skidder (esquerda) e wheeled grapple skidder (direita). ..	16
Figura 5 - forwarder (esquerda) e log loader (direita).....	16
Figura 6 – shovel.....	17
Figura 7 - Representação gráfico do modelo integrado para F10_1_1 .....	32

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Incêndios entre 2012 e 2017, em Portugal. ....	19
Tabela 2 - Características das instâncias reais.....	33
Tabela 3 - Características das instâncias de teste.....	34
Tabela 4 - Instâncias reais: indicadores valor total, tempo e gap.....	36
Tabela 5 – Instâncias teste: valor total, tempo e gap .....	37
Tabela 6 – Instâncias teste: Média do tempo e gap para F10_1, F28A_1, F28B_1 e F44_1 .....	38
Tabela 7 – Instâncias teste: Valor total, tempo e gap para F28A_1, F28B_1_1 e F44_1_1 .....	39
Tabela 8 - Instâncias teste: valor total e estimativa do desvio por aproximação e por ponto médio .....	40
Tabela 9 - Instâncias reais: valor total, desvio por aproximação e estimativa do desvio por ponto médio .....	41
Tabela 10 - Instâncias reais: desvio aproximado do valor total, desvio do NPV e desvio dos custos operacionais.....	36
Tabela 11 – Instâncias teste: desvio aproximado do valor total, desvio do NPV e desvio dos custos operacionais.....	36
Tabela 12 - Instâncias teste: Médias dos indicadores tempo, gap e estimativa do desvio do valor total por aproximação para as instâncias Fa_1_*, Fa_2_*, Fa_4_* .....	38

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS

AFVS	Associação Florestal do Vale do Sousa
CEF	Centro de Estudos Florestais
CT	Carvalho
BV	<i>Buck-to-value</i>
BMAS	<i>Biodiversity Management Area Selection</i>
BO	<i>Bucking-to-order</i>
CO	Custos Operacionais
EC	Eucalipto
GRASP	<i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedure</i>
ha	hectare
PD	Programação Dinâmica
ISA	Instituto Superior de Agronomia
MLRD	<i>Machinery Location and Road Design</i>
NPV	<i>Net Present Value</i>
PB	Pinheiro bravo
PLI	Programação Linear Inteira
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
PM	Ponto médio
SNEP	<i>Sierra Nevada Ecosystem Project</i>
SIG	Sistema de Informação Geográfica
TS	<i>Tabu search</i>
VAL	Valor atual líquido
VI	Valor ótimo do modelo integrado
VS	Valor ótimo do modelo sequencial
UG	Unidade de Gestão
WI	Valor da solução admissível do modelo integrado
WS	Valor da solução admissível do modelo sequencial
ZIF	Zona de Intervenção Florestal



# INTRODUÇÃO

As florestas compreendem uma das maiores paisagens naturais do planeta Terra e providenciam múltiplos benefícios para a sociedade (Gunn, 2007). Uma gestão eficiente dos recursos florestais naturais renováveis, como a madeira, está a tornar-se cada vez mais importante. Esta gestão deve preservar o meio ambiente, garantir a sustentabilidade dos terrenos e, simultaneamente, maximizar a receita líquida obtida a partir dos recursos florestais (Guignard *et al.*, 1998).

A presente dissertação está dividida em 5 capítulos que se complementam de forma a fazer uma descrição detalhada e abrangente do trabalho desenvolvido. É considerado um problema de gestão florestal proposto pela Associação Florestal de Vale do Sousa (AFVS). O caso considerado engloba 1137 unidades de gestão, pertencentes a cerca de 191 associados, cobrindo 7623 hectares (ha) na zona de intervenção florestal (ZIF) de Castelo de Paiva, norte de Portugal. Para a resolução do problema são desenvolvidos modelos de programação linear inteira mista.

O capítulo 2. apresenta a contextualização teórica, realizada através da revisão da literatura. Foram contemplados os vários modelos inerentes à gestão florestal, nomeadamente: modelos estratégicos, táticos e operacionais, e são referidos vários autores de estudos de referência. Esta revisão bibliográfica contempla a definição de conceitos/procedimentos centrais do tema em estudo, nomeadamente: corte e colheita de madeira; construção de estradas e transporte de madeira; planeamento de rede de estradas; transporte de madeira e melhoramento de estradas e localização de equipamentos.

O problema de gestão florestal é descrito em detalhe no capítulo 3. É necessário tomar decisões sobre quais as prescrições (tratamento, desbaste e cortes) a aplicar ao longo de um horizonte temporal pré-definido, incluindo o agendamento do corte e colheita de árvores, bem como definir o plano de transporte da madeira para o exterior da floresta. O transporte de madeira implica a construção/manutenção de estradas de floresta, a escolha dos locais de carregamento da madeira e a definição do caminho a seguir deste os locais de carregamento até às estradas municipais e ou nacionais.

O capítulo 4. contempla a metodologia utilizada para a resolução do problema. A aplicação prática deste trabalho decorreu da utilização de doze instâncias teste, correspondentes a 4 florestas, e oito instâncias correspondentes a diferentes porções da floresta que será descrita no caso de estudo. Para a análise das várias instâncias foram estruturados dois modelos, o sequencial e o integrado. No modelo sequencial considera-se, em primeiro lugar, a decisão sobre o corte das árvores, e depois a decisão sobre o transporte, pelo que são considerados dois modelos independentes. No modelo integrado, estas decisões são determinadas em simultâneo.

No capítulo 5., apresentam-se os resultados obtidos pela resolução dos modelos referidos, em programação linear inteira mista. Pretende-se comparar os dois modelos, tendo em conta a sua resolução por um solver de programação linear inteira mista (FICO® *Xpress Optimization*) e usando os indicadores qualidade das soluções obtidas, em termos de valor da função objetivo e tempo computacional necessário para obter as soluções.

# 1. REVISÃO DA LITERATURA

A gestão da floresta tem várias finalidades, nomeadamente, a produção de produtos, a proteção dos elementos biológicos, a manutenção da bacia hidrográfica, a conservação do solo, o controlo de pestes e doenças e a diminuição das perdas provocados pelos incêndios florestais. As operações florestais que suportam estes objetivos envolvem um vasto conjunto de atividades, nomeadamente, as prescrições para o corte de árvores, a construção de estradas florestais de acesso às zonas intervencionadas, a designação de áreas reservadas à vida selvagem, fogos controlados por excesso de combustível (para evitar incêndios florestais) e proteção de zonas ripárias (Church, 2007).

Neste trabalho consideramos decisões tomadas ao nível da exploração florestal tendo como objetivo a minimização dos custos de construção/melhoramento da rede de estradas florestais e os custos de localização do equipamento maximizando, simultaneamente, as receitas obtidas através dos recursos florestais. Para um horizonte temporal dividido em períodos de tempo, este problema pode ser formulado de acordo com as questões: quais as áreas que devem ser intervencionadas e em que período de tempo; qual o tipo de corte; quais as máquinas florestais que devem ser utilizadas e qual a sua localização; quais as estradas florestais que devem ser construídas e/ou mantidas de forma a assegurar o transporte de madeira; qual o plano de transporte.

Segundo Henningsson, Karlsson e Ronnqvist (2007), o processo de planeamento inclui decisões que podem ser tomadas a nível estratégico, tático ou operacional, de acordo com o horizonte temporal considerado. As decisões a nível operacional são decisões a curto prazo, que podem abranger um horizonte temporal de vários meses, levando à execução de processos/atividades florestais. Por outro lado, as decisões estratégicas e táticas percorrem um horizonte temporal a médio e longo prazo, como apresentado na figura 1.

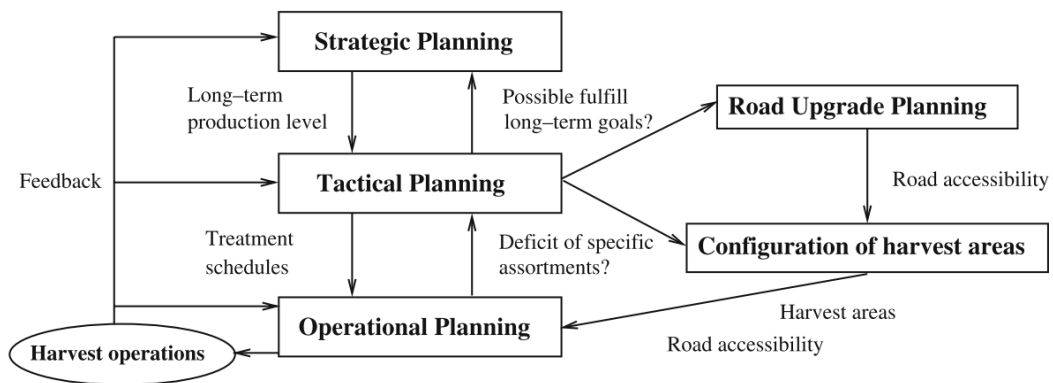


Figura 1 - Níveis de planeamento florestal. Henningsson, Karlsson & Rönqvist (2007).

## 1.1. Modelos de planejamento estratégico e tático em florestas

Os diferentes modelos caracterizam-se por serem mais abstratos e simples quando comparados com o problema real. Os modelos florestais abrangem complexas áreas de floresta, vários períodos temporais e todas as operações inerentes (construção de estradas e operações de colheita), bem como uma preocupação constante em preservar e proteger biodiversidade. Tendo em conta a sua complexidade, muitas abordagens dividem o problema numa hierarquia de problemas mais simples, sendo cada um relativo a um aspeto específico do planejamento florestal (Church, 2007).

No nível mais alto da hierarquia, estão os modelos estratégicos. Na gestão florestal, o termo “estratégico” está geralmente direcionado para a análise de decisões sobre o planejamento de uma grande área florestal, ao longo de um vasto período (que pode ir até 150 anos ou mais). O objetivo destes modelos é definir uma trajetória de decisões sobre a produção a longo termo (volume da madeira obtida, retorno do investimento e área de floresta protegida).

As operações táticas representam uma ponte de ligação entre os modelos estratégicos e os modelos operacionais, complementando as soluções alcançadas a nível estratégico com detalhes do planejamento operacional. O planejamento a nível operacional está geralmente associado a operações de curto prazo, que podem ir de vários meses a um dia, relevando-se atividades como: unidades de gestão a intervencionar em cada período, padrão do corte de árvores direcionado para a procura do mercado, definição e localização das máquinas florestais, construção ou melhoria de estradas florestais, uso de stocks e transporte de madeira.

Os modelos de gestão florestal estratégicos atentam na interação entre as decisões da gestão florestal e a sustentabilidade e retorno económico da floresta. Assim, há uma maior ênfase nos tipos de atividade e resultados em detrimento da representação dos detalhes da disposição espacial (Weintraub *et al.*, 1986). Os modelos estratégicos não podem ser implementados sem uma análise mais aprofundada, sendo essenciais no processo de tomada de decisão a longo termo, uma vez que conseguem estimar possíveis níveis de performance relativamente a um conjunto de diferentes parâmetros.

Vários modelos estratégicos têm sido desenvolvidos. Weintraub *et al.*, (1986), definiu um modelo estratégico para indústrias florestais em que as unidades de gestão (UG) ou talhões de uma região florestal são representadas como “macrounidades de gestão”, sendo cada uma composta por uma agregação de UG, semelhantes em termos de idade. O objetivo é maximizar o *Net Present Value* (NPV), ou Valor Atual Líquido (VAL), com base em decisões de gestão de UG, investimentos e operações na fábrica, aquisição de novas UG, venda de produtos.

A maior preocupação dos modelos estratégicos é a viabilidade. O modelo FORPLAN é um conhecido modelo estratégico que representa uma extensão do modelo de Navon (1971) nomeado “Timber-RAM”. Carrolet *et al.* (1995) apresentou uma abordagem, em que tenta viabilizar a solução o modelo FORPLAN. Os modelos e abordagens mencionados levam a uma importante questão: Pode uma solução estratégica específica ser aplicada a um nível operacional e produzir quantidades apropriadas de resultados ou irão as restrições escritas a nível operacional excluir elementos dessa solução?

A partir deste modelo, Weintraub *et al.*, (1986) alerta para a necessidade da utilização do modelo tático, descrevendo como a agregação de UG em “macrounidades de gestão” pode levar a resultados que não são viáveis.

O principal objetivo de um modelo tático é testar a viabilidade de uma solução de um modelo estratégico, com uma malha mais fina de restrições escritas no nível apropriado de aplicação.

Os modelos táticos são importantes, uma vez que as restrições ambientais podem ajudar na tomada de decisões para as soluções. O modelo tático de Cea and Jofre (2000) caracteriza a floresta ao nível das UG e otimiza a rede de construção de estradas, as atividades de silvicultura e o transporte da madeira.

Saber quais são as áreas florestais de onde será extraída a madeira, isto é, as unidades de corte que serão colhidas e em que período é uma parte importante do problema. As unidades de corte não são necessariamente idênticas às UG, são unidades básicas definidas a nível estratégico e tático. Desta forma, as unidades de corte são definidas com base em considerações logísticas e normas ambientais. Para resolver este problema, Burguer & Jamnick (1991) propuseram um modelo de programação linear que admite uma resolução eficiente e precisa, assegurando que o fornecimento de madeira satisfaz a procura de produtos específicos.

Na tentativa de integrar a preservação biológica com os tradicionais objetivos da gestão florestal, surgiram novas premissas relacionadas com a proteção dos animais e dos recursos naturais, que serviram de base à criação do modelo de *Biodiversity Management Area Selection* (BMAS), desenvolvido como parte da *Sierra Nevada Ecosystem Project* (SNEP). O nível tático de análise representa um nível ideal em que é possível entrosar a proteção de espécies com a proteção da biodiversidade. No entanto, é difícil representar níveis de proteção de espécies sem um detalhe espacial significativo, sendo assim, ao nível tático, que os detalhes espaciais suportam o planeamento com vista aos objetivos de conservação.

## 1.2. Modelos de planeamento operacional em florestas

Os modelos de gestão florestal estão orientados para suportar decisões sobre operações florestais ao longo de uma semana, meses ou até mesmo anos. Ao contrário dos modelos estratégicos, os modelos operacionais especificam os detalhes das áreas florestais em estudo.

Clark *et al.* (2003) afirmam que o problema de planeamento da colheita é um problema de otimização difícil. A floresta é dividida em UG, áreas geograficamente delimitadas com características físicas homogéneas: topografia, solos, rocha-mãe, hidrologia, tipo de habitat e formas de exploração. Estas zonas facilitam o planeamento da área em estudo. A principal questão é saber quais as unidades de gestão que serão cortadas, em que período e através de que rede de estradas será escoada a madeira. As restrições temporais e espaciais dificultam substancialmente a solução do problema. Importa considerar que o processo de corte, o método de transporte, a rota de acesso e a duração de cada uma destas operações afeta a rentabilidade da venda da madeira, o impacto ambiental, bem como outros fatores associados às operações florestais (Jones *et al.*, 1991).

Nesta linha de pensamento, Weintraub *et al.* (1996) desenvolveram um modelo para calendarizar o transporte da madeira de UG específicas para destinos como fábricas de celulose, jardas de triagem e serrarias. Epstein *et al.* (1995) criaram um modelo que utilizava o Sistema de Informação Geográfica (SIG) para otimizar a configuração das áreas de colheita e a localização das máquinas e da estrada. Outro problema importante aborda a construção/agendamento de estradas e colheita/agendamento, uma vez que o custo da construção e manutenção de estradas de

acesso a uma UG pode exceder o valor de UG específicas (Andalft *et al.*, 2003). Aspetos como os mencionados são importantes nas decisões a nível operacional, mas não são necessárias na tomada de decisões a nível estratégico, isto é, na tomada de decisões a longo termo.

Segundo Epstein *et al.* (2016), ao nível operacional são enumerados vários aspetos:

1. Decisões florestais relacionadas com a escolha das áreas de extração de madeira;
2. Controlo do corte de madeira nas UG<sup>1</sup> ou nos destinos onde os troncos são cortados;
3. Localização e o uso das máquinas florestais;
4. Transporte de troncos para destinos primários;
5. Manipulação dos troncos nos destinos primários;
6. Construção ou melhoramento de estradas para assegurar o abastecimento de madeira ao longo do horizonte temporal de planeamento;
7. Operações de transformação relacionadas com a cadeia de abastecimento.

A localização e a operacionalização das máquinas de colheita, bem como a construção de estradas de acesso são decisões importantes que devem ser tomadas como parte dos processos de colheita florestal, em inglês, *forest harvesting processes*. Estes são problemas importantes enfrentados pelos arquitetos florestais, e representam cerca de 55% dos custos totais de produção (Epstein *et al.* 2006). Um dos principais desafios consiste em definir um projeto que minimize o custo de instalação e operacionalização das máquinas de colheita, construção de estradas e transporte de madeira, respeitando as restrições técnicas subjacentes. O design da rede de estradas florestais requer bastante informação proveniente do SIG, nomeadamente, áreas que estão disponíveis para serem colhidas, topografia e tipo de solo, a rede de estradas existente. Os critérios mais utilizados para determinar a viabilidade das estradas e estimar os custos de construção são o tipo de solo, a drenagem e o declive. Os dados operacionais são necessários para determinar o tipo de máquinas necessárias, bem como o seu custo e produtividade. Para as operações florestais, o equipamento apropriado deve ser selecionado de forma a minimizar a deterioração do solo e assegurar a produtividade. Por exemplo, as *grapple skidders* devem ser utilizadas para extrações de pequenas distâncias. O critério mais relevante no custo de colheita é a distância entre a estrada de acesso e a área a ser colhida.

As decisões sobre a construção da rede de estradas são habitualmente consideradas decisões operacionais, se forem realizadas a curto prazo. Uma rede de estradas eficiente é muito importante, uma vez que as estradas permitem o acesso às áreas de colheita e o transporte de madeira é geralmente realizado através de camiões. O planeamento do melhoramento de estradas a longo prazo interage com o planeamento operacional e tático. O planeamento a nível tático programa o tratamento da área florestal de forma a assegurar a colheita de árvores durante vários anos. A expressão gestão florestal estratégica é frequentemente usada como sinónimo de uma estratégia planeada a longo termo, apesar de nem todas as estratégias serem a longo termo (Gunn, 2007), correspondendo ao planeamento a nível regional e nacional sendo associado à colheita sustentável de madeira num horizonte temporal a longo prazo. Desta forma, a análise tática representa uma ponte entre o modelo estratégico e o modelo operacional, interligando os dois modelos.

Tipicamente, para um problema de planeamento florestal, a procura do mercado será conhecida para as próximas 6 a 16 semanas, sendo considerada a qualidade da madeira, espessura, diâmetro e data de entrega. Assume-se que são conhecidas as árvores que podem ser cortadas neste espaço de tempo e quais as estradas primárias já existentes e que podem ser utilizadas ou

---

<sup>1</sup> Unidades de gestão são áreas homogêneas com árvores da mesma espécie e da mesma idade.

que precisam de melhoramento. O corte e colheita das árvores são tipicamente executados por *harvesters* e *skidders*, quando os terrenos não têm declive, e torres ou *cable logging* para terrenos mais íngremes. Existem várias máquinas florestais para executar o corte e o transporte da madeira, as quais serão especificadas posteriormente. Os custos e a produtividade das máquinas e do transporte são aspetos importante, geralmente contemplados nos modelos dos problemas.

As questões de ordem ambiental também devem ser consideradas, restringindo, preferencialmente, as decisões de ordem económica. A preservação do solo e conservação da qualidade da água são aspetos importantes que requerem cuidado. Isto significa, entre outros aspetos, que não devem ser empregadas máquinas florestais pesadas em solos frágeis e que devem ser construídas estradas de forma a prevenir a erosão dos solos e contaminação das águas (Epstein *et al.* 2016).

Segundo Schiess and Krogstad (2007), as operações florestais são geralmente consideradas como uma troca entre benefícios económicos e impactos ambientais, em que qualquer proteção ambiental adicional é vista como uma redução dos retornos económicos. No entanto, relativamente à colheita e ao transporte de madeira, é possível encontrar soluções rentáveis e que melhoram os impactos ambientais.

### 1.3. Corte e colheita de madeira

O corte de árvores é a operação que consiste no corte de troncos em toras<sup>2</sup> com medidas predefinidas, sendo o primeiro passo para a produção de papel, madeiras e outros materiais. As árvores podem ser cortadas manualmente, método preferível para o corte de troncos grandes em terrenos íngremes e inacessíveis a equipamentos mecânicos, ou com recurso a máquinas florestais. Mundialmente, a adoção de sistemas mecanizados para as atividades de colheita de madeira está a aumentar (Marshall, Murphy, and Boston 2006). Desta forma, o corte, a remoção das ramificações e a escolha dos ramos pode ser realizada por uma só máquina. Razões económicas, como a necessidade de aumentar continuamente a produtividade, e pressões sociais aliadas à necessidade de segurança nas operações florestais são os principais fatores que levam ao desuso das operações florestais manuais.

A definição de um padrão de corte depende da espécie da árvore, diâmetro, taxa de conicidade e qualidade do caule, considerando as propriedades da madeira e o seu valor de mercado. O corte também pode ocorrer numa indústria de serração, obrigando a que os troncos inteiros sejam devidamente transportados. Aqui, cada árvore é analisada, de forma a ser determinado o melhor padrão de corte para a mesma, com base nos modelos de Programação Dinâmica (PD), do inglês *dynamic programming*. São organizadas rotinas de corte otimizado, em que são registadas as listas de preços para combinações de espécies, comprimento e diâmetro, de forma a maximizar o valor de cada árvore. O corte e a colheita são decisões que, em muitos casos, se complementam, sendo selecionadas as melhores unidades de corte, em simultâneo, com padrões de corte que satisfazem uma procura específica. (Epstein *et al.* 2016).

Dado que não é possível explicitar todos os padrões de corte num modelo de programação linear, vários autores estruturaram soluções que permitissem integrar esta variável nos seus modelos. Guigan (1984) propôs incluir sete padrões gerados externamente. Um modelo de programação linear, com uma abordagem *branch-and-bound* para gerar padrões de corte foi

---

<sup>2</sup> Uma tora é uma porção de tronco de uma árvore.

utilizada por companhias florestais do Chile (Epstein *et al.*, 1999). Esta abordagem permitiu melhorar as soluções em 5% quando comparado com o método utilizado por Guigan (1984).

O processo de corte tem como objetivo obter o maior lucro possível, considerando que quando mais comprida e larga for a peça, maior será o seu valor de mercado. Marshall (2005), afirma que nos últimos 45 anos, várias técnicas de otimização matemática têm sido desenvolvidas e utilizadas para resolver dois principais problemas de corte de madeira: o problema de otimização da árvore individual, *individual tree optimization problem*, conhecido como *buck-to-value* (BV), e o problema de árvores múltiplas com restrições de procura, *multiple trees with demand constraints problem*, conhecido como *bucking-to-order* (BO).

O principal objetivo do BV é obter o máximo retorno financeiro a partir de um caule individual. Um caule de uma árvore pode ser cortado em toras de várias maneiras possíveis, em que cada conjunto de segmentos geram um retorno financeiro diferente. Contudo existe, geralmente, um padrão de corte específico que gera o valor máximo de retorno.

Uma das técnicas de otimização mais comum que tem sido utilizada para resolver problemas BV é a PD. Clemmons (1966) foi o primeiro a propor o uso desta técnica para resolver o problema BV. Pnevmticos and Mann (1972) também apresentaram um dos primeiros modelos que envolvem PD. O objetivo deste modelo era maximizar o valor de um tronco através da avaliação do número de toras a cortar, o seu diâmetro, o seu comprimento e a localização das toras ao longo do tronco. As restrições estabelecidas neste modelo foram: a) o comprimento total das toras deve ser menor ou igual que o comprimento inicial do tronco; b) o diâmetro de qualquer tora deve estar compreendido pelos limites dos diâmetros do tronco restante; c) tanto o comprimento como o diâmetro devem estar dentro dos limites especificados pelo gestor.

Briggs (1997) melhorou o modelo de Pnevmticos and Mann (1972), que utiliza as especificações das serrarias de diâmetros mínimos e máximos. Neste modelo, o autor assume que o tronco é retilíneo, não considerando as curvas ou defeitos do tronco. O modelo otimiza apenas o volume de toras ou madeira, em vez do valor da madeira e dos subprodutos. Se os produtos residuais forem altamente valorizados, este modelo não será suficiente. As limitações deste modelo foram superadas em 1980, quando o mesmo autor criou um novo modelo e recorre à abordagem PD, que permite decompor um problema grande em vários problemas mais pequenos, designados etapas do procedimento. Esta técnica é utilizada para resolver problemas de multi-etapas que não podem ser vistas de forma independente, mas que juntas permitem chegar a uma solução. Por exemplo, um problema que requer uma decisão num período temporal de um ano pode ser decomposto em quatro etapas, cada uma com uma decisão ótima associada. Quando todas as etapas estão resolvidas, a solução ótima para o problema original é obtida (Grondin, 1998).

Geerts and Twaddle (1984) também desenvolveram um algoritmo de PD que foi implementado num produto de software chamado *Assessment of Value by Individual Stems*. Esta formulação utilizou a definição de etapa apresentada por Briggs (1980) e considerou a qualidade da tora de uma forma determinística. Cada potencial tora foi verificada para assegurar que a sua qualidade, nesta fase, estava de acordo com o tipo de qualidade requerida. Existem outras técnicas bastante utilizadas para resolver problemas BV, nomeadamente, programação em rede, do inglês *network programming*.

A relação próxima entre a PD e a programação em rede torna possível resolver o problema de corte ótimo de forma eficiente. Nos anos 80, a análise da programação em rede foi utilizada para resolver problemas BV. Sessions (1988) formulou este problema como uma rede em que

todos os pontos possíveis de corte ao longo do tronco da árvore representavam os nodos numa rede e os arcos que ligavam os nodos representavam os valores da tora que podia ser cortada entre eles. O objetivo desta formulação é encontrar o caminho pelos arcos e nodos que resulta no valor máximo.

Segundo (Marshall, Murphy, and Boston 2006), os sistemas mecânicos de colheita/processamento têm desempenho inferior aos sistemas manuais de corte. Em média, os sistemas mecânicos de colheita/processamento estão a perder 18% do valor da madeira. Os sistemas manuais, em comparação, perdem, em média, 11% do valor da UG. Estas perdas têm impulsionado significativamente a investigação nas operações de corte e colheita, uma vez que o “corte ótimo” de toras é um meio efetivo para a tomada de decisões, prevenindo erros que resultam na perda de lucro (Marshall, Murphy, and Boston, 2006). Assim, o corte de árvores é uma das mais importantes operações na transformação de árvores em matéria prima. Uma decisão nesta etapa pode comprometer a otimização da recuperação do volume ou valor da madeira.

#### **1.4. Construção de estradas e transporte de madeira**

A indústria florestal é muito dependente de uma rede de estradas eficiente, uma vez que a maioria da madeira é transportada por camiões (Henningsson, Karlsson and Rönnqvist, 2007).

As estradas que mantêm a topografia original têm tráfego restrito à época seca, quando são estradas vulneráveis com grandes taxas de erosão em épocas de chuva. A adição de uma camada de rocha leva a uma significativa redução da produção de sedimentos e dos estragos causados pelo tráfego (Kochenderfer & Helvey, 1984). A cobertura das estradas com gravilha ou cascalho é, por norma, o maior custo na construção de estradas, podendo representar entre 30% e 60% do custo total. Os solos suficientemente fortes prescindem de gravilha, evitando assim o custo de aquisição, transporte, colocação e eventual remoção da mesma, bem como a redução do impacto ambiental.

A construção de novas estradas implica a alteração da topografia natural, devido à construção de estruturas que permitem o acesso à floresta. Durante a construção das estradas, podem ser adicionadas estruturas de drenagem e camadas de revestimento que minimizam os futuros danos causados às mesmas, bem como reduzem as futuras despesas de manutenção e ambientais. No entanto, se uma estrada for construída para ser utilizada apenas durante a época seca e depois ser descontinuada, não se justifica construir uma estrutura de drenagem e o solo pode apresentar maior declive, o que vai permitir a redução da movimentação e erosão do solo, e assim, diminuir o impacto ambiental.

A incorporação de material orgânico na estrutura da estrada pode levar ao seu enfraquecimento, devido ao rápido desgaste do material. Este problema pode ser evitado através da remoção da matéria orgânica e vegetação existentes. Esta limpeza pode representar entre 10% e 20% dos custos de construção da estrada. Uma superfície nivelada é estruturada através da escavação, movimento e compactação do solo, sendo o objetivo principal o de minimizar os custos económicos e ambientais (Schiess and Krogstad, 2007).

No que ao transporte diz respeito, as estradas florestais existem para reduzir o custo de transporte. O tempo de viagem é o inverso da velocidade de viagem. A velocidade pode ser afetada pelas curvas acentuadas, declives acentuados e pouco alcance de visibilidade. Ao longo de estradas mais estreitas, a velocidade pode ser limitada pela largura da estrada e rugosidade da

superfície, que também aumenta a erosão da estrada. Uma estrada de asfalto permite uma maior velocidade e não provoca a desintegração de sedimentos, enquanto uma estrada sem melhoramentos, embora seja mais barata, vai gerar mais sedimentos, reduzir a velocidade e aumentar os custos do tráfego (Schiess and Krogstad, 2007).

Dada a necessidade de uma rede de estradas eficiente, a manutenção da estrada também é um tópico importante. Após a sua construção, todas as estradas florestais sofrem danos derivados da sua utilização e exposição aos fatores abióticos. A compressão provocada pelos veículos danifica a estrada, atrasam o tráfego e provocam a erosão dos sedimentos. Esta degradação natural pode ser controlada através da manutenção periódica das estradas. A estrutura de drenagem, supracitada, pode também ser limpa periodicamente, uma vez que acumula sedimentos e vegetação. A manutenção não é, geralmente, considerada no planeamento inicial da construção da estrada e, embora reduza a erosão da estrada, também causa alterações no solo e erosão. Assim, se a estrada não for necessária nos próximos anos poderá ser descontinuada. No entanto, a mesma continuará a sofrer erosão devido aos eventos naturais (chuva, vegetação, variação de temperatura), o que aliado à saturação e acumulação de detritos na estrutura de drenagem, poderá causar deslizamento de terras. Desta forma, pode compensar a destruição da estrada e das suas estruturas durante os seus anos de inatividade ou construir barras ao longo da mesma que dissipem a erosão (estas alterações podem ser facilmente revertidas quando a estrada for reaberta) sendo possível, desta forma, reduzir os impactos ambientais. Ainda é possível destruir completamente a estrada existente e construir a estrada substituta numa melhor localização, uma vez que a tecnologia utilizada na construção de estradas ainda está em evolução (Schiess and Krogstad, 2007).

#### **1.4.1. Planeamento da rede de estradas**

Os modelos de uma rede de estradas podem ser representados através de um grafo, em que as arestas representam as estradas que podem vir a ser construídas/mantidas.

De acordo com a linguagem matemática, um grafo  $G=(X,A)$  é um par onde  $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  é um conjunto de objetos chamados nodos ou vértices e  $A=\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  onde  $a_j$  é um par de nodos. Se os pares são ordenados, isto é,  $a_i=(x_k, x_l)$ , chamam-se arcos e o grafo diz-se orientado; se os pares não são orientados,  $a_i=\{x_i, x_l\}$ , chamam-se arestas e o grafo diz-se não orientado.

Weintraub and Navon (1976) apresentam no seu artigo um modelo de programação inteira linear mista, que integrou a análise da gestão da madeira, construção e manutenção de estradas florestais e transporte de toras com o objetivo de maximizar o lucro das vendas de madeira. A complexidade deste modelo surge da necessidade de ganhar acesso a certas unidades de gestão antes de estas serem tratadas e colhidas. Assume-se, neste modelo, que todas as estradas permanentes são mantidas em boas condições desde o momento da sua construção até ao momento em que termina o horizonte temporal do planeamento.

Se é pretendido o transporte da madeira ao local onde esta vai ser vendida, é necessária a definição de uma rota que permita este transporte. Cada uma destas rotas requer a especificação de uma variável contínua no modelo. Desta forma, os autores definem critérios que impedem o crescimento exponencial de arcos e nodos e que selecionam um número razoável de rotas que unem cada nodo de acesso ao nodo da venda da madeira. Os critérios que permitem excluir rotas

são: (1) minimizar custos de transporte, (2) minimizar o custo de construção e manutenção de estradas e (3) senso comum.

Relativamente ao ponto dois, a minimização do custo de construção e manutenção de estradas baseou-se num procedimento heurístico. Os autores propuseram uma abordagem que determina todas as soluções de custo mínimo. Para tal, foi utilizada uma abordagem baseada no problema de *Steiner* que consiste em conectar um dado subconjunto de nodos da rede de estradas a um custo mínimo, recorrendo a quaisquer restantes nodos como intermediários. Para isso, a aplicação contempla o custo de construção e os custos fixos de manutenção. Este algoritmo propõe, novas rotas que, devido aos arcos partilhados, reduzem o custo total de construção e manutenção.

Relativamente ao ponto três, especifica-se o bom senso e o conhecimento da floresta e das características dos sistemas de transporte da madeira, que serão abordadas mais à frente. A capacidade de um segmento de estrada deve ser especificada para restringir a frequência das viagens de transporte de madeira por camiões, de forma a controlar a poluição ou permitir a utilização das estradas para outros fins. As restrições de capacidade das estradas podem ser especificadas para limitar o número de veículos que necessitam de passar por aquela rota.

Jones *et al.* (1991) apresentam, no seu artigo, uma abordagem do problema de transporte e construção de estradas, recorrendo a um processo iterativo, denominado Programação Inteira Heurística, do inglês *Heuristic Integer Programming*. Em cada iteração, uma solução processada por regras heurísticas é encontrada. As variáveis inteiras, que têm valores fracionários, são ajustadas, tendo em conta a geografia do terreno e tentando satisfazer a produção de madeira, a preservação do solo e outras restrições, de forma a criar uma rede de estradas consistente. Esta abordagem permitiu a obtenção de soluções em intervalos de tempo significativamente mais pequenos.

Guignard *et al.* (1998) propõe um modelo com variáveis binárias associadas a padrões de corte e segmentos de estrada. O modelo pretende melhorar substancialmente as lacunas presentes nos problemas de planeamento do corte e transporte de madeira, modelados em programação inteira mista, que se revelam difíceis de contornar. Assim, os autores recorreram a uma combinação de técnicas: introdução de desigualdades válidas, possibilitando a abordagem do modelo pelo algoritmo *branch-and-bound*, selecionando as prioridades, baseando-se no conceito *Double Contraction*, de Spielberg (1972). Estes melhoramentos permitiram uma redução significativa no tempo de processamento do modelo. Este modelo mostra como a solvabilidade pode ser melhorada para o modelo de colheita e transporte, recorrendo a diferentes desigualdades válidas e seleção cuidada de prioridades.

Clark *et al.* (2000) consideram o acesso via estrada um componente crítico no planeamento da colheita, dado que a falta de estradas a uma determinada unidade de gestão impossibilita o corte de árvores da mesma. Por outro lado, é inviável a construção de estradas em excesso devido ao seu elevado custo de construção. Para solucionar este problema, os autores incorporaram a construção da rede de estradas de acesso no planeamento do processo de corte e colheita de árvores. O problema consiste em determinar o planeamento temporal da construção de estradas e quais as unidades de gestão que serão colhidas com o objetivo de maximizar as receitas geradas e minimizar os custos de construção de estradas. Para o efeito, desenvolveram uma heurística que integra a escolha de estradas e unidades de gestão através de uma abordagem baseada no problema da *minimum spanning tree* (MST), que envolve a escolha de um conjunto de ligações que têm o menor comprimento total. Integra, ainda, o acesso às estradas através das

unidades de gestão. Os autores admitem como uma falha o fato de assumirem que uma estrada de acesso pode ser construída em qualquer local da floresta, que pode ser viável ou não. A este modelo é aplicada uma heurística em três fases, denominada *INROADS*.

Richards and Gunn (2000) otimizam a programação simultânea da colheita e construção de estrada, apresentando um modelo resolvido com um método heurístico, baseado em técnicas de *Tabu Search* (TS). O método TS é uma ferramenta de trabalho estratégica para a otimização da heurística, baseada na procura local e vizinha, num sistema de estruturas de memória que possibilita o acesso a feedback importante no histórico da procura e num conjunto de princípios de resolução do problema inteligentes que exploram essa memória. Neste algoritmo, as decisões sobre a rede de estradas e gestão da colheita são consideradas simultaneamente. As variáveis de decisão do modelo são binárias e decidem quando cortar cada unidade de gestão e quais as estradas a construir em cada período do horizonte de planeamento.

Este artigo aborda três importantes elementos do planeamento tático: planeamento da intervenção, restrições espaciais e o design de sistemas de acesso. Uma importante função do planeamento tático em gestão florestal é a escolha de agendamentos explícitos, espaciais e temporais, tanto para a construção de estradas como para as atividades de colheita florestal. Todo este processo deve ir ao encontro dos objetivos do processo de planeamento estratégico, considerando que as decisões de colheita estão sujeitas a restrições espaciais e ambientais. Ao mesmo tempo, o planeamento e custo da rede de estradas do planeamento a médio prazo devem ser considerados. Foi produzido um conjunto de soluções que permite analisar as trocas entre a perda de produtividade, devido ao tempo gasto na colheita, e o custo da construção de estradas, para um horizonte temporal de 10 a 30 anos. No entanto, os autores reconhecem algumas falhas no modelo: cada unidade de gestão tem apenas um ponto de entrada para a rede de estradas e a função objetivo não faz qualquer referência aos custos de transporte, o que torna o modelo insuficiente para ser utilizado como ferramenta de planeamento operacional do sistema de transportes.

Andalaft *et al.* (2003), apresentam um modelo que inclui decisões a curto termo relativas a áreas de colheita, a quantidade de madeira a produzir, as estradas a serem construídas ou melhoradas para o acesso dos locais de armazenamento. O plano temporal são apenas 2 anos, que significa considerações sobre as diferentes estações do ano (verão/inverno). Existem, assim, dois tipos de estrada diferentes, um tipo que está aberto no verão e o outro tipo que está aberto no inverno. A madeira colhida pode ser armazenada do verão ao inverno. As estratégias de solução envolvem o fortalecimento do modelo e a aplicação da Relaxação Langrangiana.

Meignan *et al.* (2012) apresentam um problema expresso como *P-floresta*, que consiste em determinar um conjunto de estradas que serão construídas e utilizadas no transporte de árvores ou toras das áreas de colheita para as fábricas ou para os locais de armazenamento. Quando é considerada a totalidade da cadeia de fornecimento de produtos da floresta, o problema consiste em determinar os fluxos numa dada rede de estradas para satisfazer a procura de indústria de produtos florestais. O objetivo é minimizar o custo de construção e colheita.

Silva *et al.* (2016) apresentam um estudo em que propõem modelos de Programação Linear Inteira (PLI). Aplicam o algoritmo de otimização em redes *Floyd-Warshall* na geração de rotas de produção madeira, minimizando o custo de produção resultante das atividades de colheita e manutenção de estradas.

Kirby *et al.* (1986), com base no artigo de Weintraub and Navon (1976), descrevem uma formulação inteira denominada *Integrated Resource Planning Models* (IRPM) em gestão

florestal, que integra o problema de colheita com a configuração da rede de estradas. Guignard *et al.* (1998) e Anadalaft *et al.* (2003) descrevem abordagens da formulação IRPM pelo método exato, utilizando o algoritmo *branch-and-bound*. Os algoritmos de caminho mais curto, como o denominado *Floyd-Warshall*, tem sido utilizado na formulação de IRPM.

Foram simulados cenários considerando idades mínimas distintas de corte de talhões de *Pinus spp.* e *Eucalyptus spp.* Estes foram comparados de acordo com critérios de performance: rendimento da colheita, rede de estradas utilizada e custo unitário de produção. A diminuição da idade mínima de corte reduz a produtividade média das unidades de gestão agendadas para colheita e, por outro lado, requer menos estradas edificadas, o que conseqüentemente diminui o custo unitário de produção. As soluções obtidas pelo uso dos modelos PLI estiveram menos de 0,1% distantes do ótimo global.

Naderializadeth & Crowe (2018) apresentam um modelo de planeamento florestal integrado em que a função objetivo resulta na maximização da diferença entre as receitas da colheita florestal e custos de transporte e construção de estradas.

O artigo pretende desenvolver inovações na formulação do modelo integrado de forma a que: 1) possam ser geradas soluções para problemas com um grande conjunto de estradas candidatas; 2) seja obtido um maior valor total (lucro obtido com a venda da madeira) quando comparado com formulações anteriores; 3) seja focada a melhoria das soluções através da redução nos custos totais de construção da rede de estradas e transporte.

A formulação do modelo integrado foi desenvolvida utilizando as seguintes estratégias: cada estrada candidata é representada no modelo por dois arcos diretos, bem como um conjunto de restrições de fortalecimento. As variáveis de decisão do modelo são binárias e definem: se uma dada unidade de gestão é colhida num dado período ou não; se um arco é construído de um nodo ao outro num dado período ou não. A nova formulação implica a utilização de um maior número de restrições relativamente a formulações anteriores.

#### **1.4.2. Transporte de madeira e melhoramento de estradas**

A colheita e o transporte são processos relacionados, pelo que o seu planeamento é, muitas vezes, realizado em conjunto. Inicialmente, são definidas as unidades de corte. As principais decisões são quais as unidades que vão ser cortadas bem como a calendarização dos cortes. O planeamento também inclui o transporte de madeira. As decisões são quais os volumes devem ser transportados das áreas de corte para as fábricas, num determinado período.

No planeamento do processo, a procura de matérias primas pelas fábricas é distribuída mensalmente. As condições meteorológicas podem variar durante o ano, pelo que devem ser consideradas para a gestão das estradas. Durante alguns períodos há incerteza relativamente à acessibilidade de uma parte da rede de estradas, devido à instabilidade do solo. A procura das matérias primas por parte das fábricas requer o fornecimento contínuo de madeira durante todo o ano. Assim, para que a procura seja satisfeita, as companhias florestais possuem grande reservas de *stock* de matéria-prima localizada em estradas acessíveis durante todo o ano. O armazenamento externo de matéria-prima resulta na deterioração da qualidade, o que causa custos consideráveis. Às vezes, estradas intransitáveis podem ser evitadas por rotas alternativas de camiões, embora o aumento das distâncias de transporte resulta num aumento considerável do custo de transporte. O *output* de todo este planeamento é uma sequência de zonas de colheita distribuídas ao longo do

ano, assegurando a acessibilidade das estradas necessárias para que a colheita mensal corresponda à procura das instalações de processamento de madeira (Epstein *et al.*, 2016).

Segundo estes autores é importante decidir a sequência na qual as unidades de gestão devem ser colhidas, para que se saiba o custo da deslocação das máquinas e das equipas de trabalho. Para estas decisões, é necessário considerar períodos mais pequenos, com um período total de planeamento de cerca de quatro a oito semanas. Para este período de planeamento, também é importante considerar o tempo que as toras estão armazenadas, uma vez que o seu valor e propriedades sofrem alterações. A cada equipa é dado um calendário, para que haja uma sequência de áreas a serem colhidas durante o período de planeamento. Os custos de deslocação de equipas e máquinas é considerado.

As decisões sobre a construção de estradas são tipicamente modeladas em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) considerando o planeamento florestal em horizontes temporais de uma a cinco décadas (ou mais décadas).

De acordo com Andalaft *et al.* (2003), nos primeiros modelos de planeamento, as atividades de transporte e de construção de estradas eram agendadas de forma coordenada com as colheitas, mas não de forma integrada. As vantagens de integrar ambos os processos de decisão num único modelo de programação linear com variáveis binárias foram apresentadas por Weintraub and Navon (1976) e Kirby *et al.* (1980, 1986). As soluções que integram ambos os processos mostraram ser de 15% a 45% melhores do que aquelas que consideram os dois aspetos separadamente. O *trade-off* entre as perdas de produtividade e a construção de estradas são temas abordados no estudo de Gunn and Richards (1997), num horizonte temporal de dez a trinta anos, recorrendo ao método TS. Guignard *et al.* (1998) mostra como a resolução do modelo integrado de colheita/transporte, pelo uso de diferentes desigualdades válidas e da seleção cuidadosa das prioridades de ramificação do método *branch & bound* é mais eficiente.

Andalaft *et al.* (2003), apresenta um modelo chamado *Optimed* que inclui decisões a curto termo, realizando uma abordagem do problema que inclui as típicas decisões operacionais de planeamento da colheita florestal, bem como quais as estradas que devem ser construídas ou melhoradas para possibilitar os acessos, considerando diferentes padrões de estrada (acessíveis durante o Verão/Inverno). Neste modelo existem dois tipos diferentes de estrada, definindo em quais estações as estradas estão abertas, considerando-se que a madeira pode ser armazenada do verão ao inverno. Este modelo suporta decisões como quais os talhões que devem ser colhidos, que quantidade de madeira é necessária para satisfazer a procura e quais as estradas são necessárias para possibilitar o acesso às áreas de colheita, num horizonte temporal de dois a cinco anos. As estratégias de solução deste modelo envolvem o fortalecimento do modelo e a *Langrangean Relaxation*. Cea and Jofre (2000) apresentam um modelo de dois níveis e um algoritmo de otimização para auxiliar o planeamento estratégico e tático em conjunto. O planeamento tático inclui decisões sobre a colheita, transporte, melhoramento ou construção de estradas considerando os diferentes tipos de estrada.

Olsson (2004) apresenta um modelo de PLIM, que se baseia nas decisões táticas do planeamento florestal, nomeadamente, decisões sobre a melhoria e restauração de estradas existentes e transporte. O problema é facultar o acesso a áreas florestais disponíveis para colheita durante a parte do ano em que as estradas de categoria mais alta estão acessíveis (neste trabalho, tipicamente entre seis e dez semanas por ano), considerando os custos de restauração das estradas e transporte.

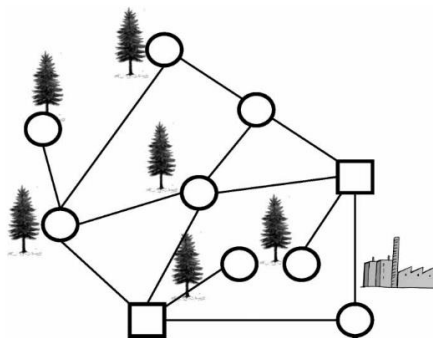


Figura 2 - Uma rede que inclui seis áreas de colheita, uma travessia, dois nodos de passagem (quadrados) e uma fábrica. Karlsson, Rönnqvist and Frisk (2006)

Karlsson, Rönnqvist and Frisk (2006), apresentam um artigo que descreve um sistema de apoio à decisão chamado *RoadOpt* para o planeamento do melhoramento das estradas florestais. Este estudo é realizado na Suécia, onde o clima é muito variável, verificando-se invernos muito frios e verões muito quentes. Para assegurar o abastecimento de madeira, as companhias constroem grandes *stocks* de madeira, o que leva a perda de qualidade e, conseqüentemente, a perdas de lucro. O acesso a estas zonas de armazenamento é, por vezes, incerto, pelo que os autores consideraram a melhoria da rede de estradas de forma a garantir a acessibilidade ao longo de todo o ano.

Esta abordagem recorre ao SIG para apresentar e analisar dados e resultados. O horizonte temporal do planeamento são dez anos. Para saber quais são os tipos de estradas requeridas para assegurar a acessibilidade às áreas de colheita durante diferentes condições meteorológicas, é utilizado o modelo em que as decisões de fluxo são definidas como rotas para cada par de origem – destino. O modelo inclui os custos de transporte e o custo de melhoria das estradas, baseado no comprimento e classes de estradas (diferentes classes de acessibilidade). Segundo Lofroth *et al.* (2000), as estradas florestais privadas são divididas em quatro classes de acessibilidade: classe A – camiões e carros autorizados em todas as estações; classe B – camiões autorizados em todas as estações, exceto nos períodos de degelo, e carros autorizados todas as estações; classe C – camiões autorizados todas as estações, exceto durante o degelo e chuva intensa, e carros autorizados todas as estações, exceto durante o degelo; classe D – camiões autorizados apenas durante o inverno, e carros autorizados apenas com condições meteorológicas favoráveis.

O sistema *RoadOpt* tem várias funções de visualização, permitindo estimar quais as áreas de colheitas que são possíveis de alcançar a partir de estradas da classe A, B, C ou D e os volumes a que estes pontos de colheita correspondem; definir quais são os troços de estrada que são importantes recuperar, quais as áreas de colheita que são consideradas para o período do degelo, quais as estradas que são utilizadas para grandes fluxos. Os resultados são apresentados em tabelas e num mapa que apresenta todos os segmentos de estrada que devem ser recuperados.

O problema descrito levou ao modelo baseado na PLIM, desenvolvido por Henningson, Karlsson and Rönnqvist (2007), que consideram um problema de melhoramento da rede de estradas da perspectiva de uma companhia florestal sueca, com um horizonte de planeamento de dez anos. O objetivo foi minimizar os custos do melhoramento de estradas e do transporte, apresentando dois modelos de programação inteira mista, que são problemas de fluxo (*uncapacitated fixed charge network flow*) incluindo vários períodos temporais e um conjunto de classes de estrada. Um dos modelos é baseado em fluxos de arco e o outro é baseado em fluxos

de rota. Para uma instância típica de planeamento, os modelos tornam-se grandes e é proposta a melhoria da solução através do fortalecimento do modelo.

## 1.5. Localização de equipamento

Existem várias possibilidades nas várias operações de extração de madeira, pelo que a escolha do sistema apropriado é baseada num elevado número de variáveis: topografia (declive); mutabilidade e consistência; solo (saturação, composição, sensibilidade); tamanho da árvore, volume e densidade; potenciais constrangimentos ao acesso da estrada; características e performance dos equipamentos; local do processamento (remoção das ramificações e corte) e requerimentos do mercado (Schiess and Krogstad, 2007).

Perante uma área a ser explorada, uma das decisões mais importantes a curto prazo está relacionada com a utilização das máquinas florestais, necessárias para o corte e transporte da madeira. Depois de cortadas as árvores de uma determinada UG, são retiradas as ramificações e transportadas para os locais, de onde serão levadas até à estrada principal em camiões (Epstein, Karlsson, Rönnqvist, & Weintraub, 2016).

Segundo Epstein *et al.* (2001) as questões que devem ser consideradas são: quais áreas devem ser colhidas com *skidders* e com torres, onde devem ser localizadas as áreas de recolha para descarga da madeira pelas torres, qual superfície deve ser colhida com cada uma das torres específicas, quais estradas devem ser construídas para transportar o volume colhido.

Existem muitos equipamentos que permitem o transporte dos troncos para o local onde serão, posteriormente, recolhidos. Quando a topografia do terreno, o tipo de solo e o diâmetro dos troncos permitem, este transporte é realizado por *ground-based systems*, que transportam as árvores derrubadas para o local de armazenamento. Este método é considerado uma opção mais eficiente e flexível. O declive também é decisivo na utilização das máquinas, sendo a sua utilização restrita a solos com menos de 30% ou 40% de declive. A chuva prolongada é um fator que pode impossibilitar estes equipamentos. Caso se decida pela utilização destas máquinas em terrenos desfavoráveis, decorrerá uma compactação e erosão do solo, que pode ser reduzida pela *harvester*. O levantamento da parte da frente da tora (*skidding*), da tora inteira (*forwarding*) ou o balançar da tora (*shovel yarding*), reduz simultaneamente a perturbação e erosão do solo, mas também os custos em combustível e permite a otimização do tempo de superação do atrito e eventuais interrupções do processo.

As operações de corte mecanizado são executadas com recurso a máquinas como a *feller-buncher* (figura 3), que corta as árvores e organiza-as em conjuntos, e a *harvester* (figura 3) que corta as árvores e remove as ramificações, organizando os troncos numa camada que protege o solo.



Figura 3 - Feller-buncher de esteira (esquerda) e harvester (direita). Schiess and Krogstad 2007

No que diz respeito ao transporte, a *wheeled grapple skidder* (figura 4) consegue agarrar os grupos de troncos organizados pela *feller-buncher* (figura 3); a *clambunk skidder* (figura 4) consegue transportar uma maior quantidade de madeira e a *forwarder* (figura 5) pode transportar uma grande quantidade de toras.

As taxas de produção, calculadas em volume por hora, e os custos de produção são



Figura 4 - *clambunk skidder* (esquerda) e *wheeled grapple skidder* (direita).

afetados por diversos fatores, nomeadamente, a densidade florestal, tamanhos de toras, distâncias entre locais de operação e habilidade do operador. A *skidder* ou *forwarder* (figura 5) dirige-se para as árvores derrubadas ou troncos, recolhe-os e transporta-os para o ponto de recolha.



Figura 5 - *forwarder* (esquerda) e *log loader* (direita)

Existe uma solução que permite ultrapassar as limitações topográficas e de solo de forma rápida, *cable-based yarding*, que consiste num sistema aéreo de cabos que puxa os troncos para o local pretendido, através de uma torre. A *shovel* (figura 6) balança as toras em direção ao local ao ponto de recolha.



Figura 6 – shovel

Epstein *et al.* (2006) e Legües *et al.* (2007) investigaram o problema *machinery location and road design* (MLRD), que consiste em determinar a localização das máquinas florestais de colheita e a localização das estradas de acesso considerando as restrições topográficas, custos de colheita e custos de construção de estradas (que depende da distância entre as áreas que serão colhidas e as máquinas florestais). Tradicionalmente, este problema era solucionado pelos engenheiros florestais, que planeavam a localização das máquinas florestais manualmente, baseando-se em mapas topográficos. Uma vez que este processo era bastante demorado e não permitia explorar outras alternativas, a introdução do SIG melhorou significativamente o planejamento deste processo.

Epstein *et al.* (2006), apresentam uma nova abordagem ao problema do MLRD, baseada numa resolução heurística do problema com recurso à PLIM. O Departamento de Engenharia Industrial da Universidade do Chile, em cooperação com a *Oregon State University* e um grupo de empresas florestais, implementou esta metodologia – PLANEX. Com este programa, podem ser incorporados vários parâmetros, incluindo características técnicas das máquinas, construção de estradas, transporte, custos da colheita, pontos de saída e variáveis económicas que restringem a colheita. Podem ser definidos segmentos de estradas que criem barreiras. A informação topográfica, os volumes de madeira e as redes rodoviárias são originárias do SIG. A metodologia de análise consiste em dividir o terreno em estudo em pequenas células de  $10 \times 10$  metros, calculando e armazenando as informações, os volumes de madeira disponíveis e outros dados relevantes para cada célula. Para cada potencial localização de torres ou *skidders*, o sistema identifica todas as células alcançáveis desse local.

Assim, o PLANEX (Epstein *et al.* 2001) interage com um SIG, obtendo informações topográficas e volumes de madeira. Uma solução visual inclui a localização de torres, áreas de colheita de cada equipamento, áreas não colhidas ou áreas inacessíveis, estradas existentes usadas e estradas novas a serem construídas. O sistema também fornece vários relatórios que especificam as coordenadas da localização das torres, custo médio de colheita e custo da construção da estrada e transporte de madeira, planeando a área florestal até mil hectares de terreno. Esta ferramenta gráfica automaticamente projeta a rede rodoviária, que é o terceiro custo operacional mais importante, após transporte e colheita.

Legües *et al.* (2007) estudam dois problemas de colheita florestal, nomeadamente, a seleção dos locais para as máquinas que transportam os troncos de árvores dos pontos onde estes são cortados para a estrada nacional e a projeção da rede de estradas de acesso que liga a rede rodoviária existente aos pontos onde as máquinas estão instaladas. Este é um problema difícil de solucionar, sendo proposta neste artigo uma solução baseada no *Tabu Search* (TS).

Após a identificação das localizações com o método TS, utilizou-se uma heurística baseada na árvore de *Steiner* para determinar a rede de estradas.

A localização das máquinas florestais é um importante problema para a indústria madeireira, uma vez que estes são equipamentos dispendiosos. Vera *et al.* (2003) apresentam uma modelação deste problema como um problema de programação linear mista. A combinação do desenvolvimento de um algoritmo baseado na Relaxação Lagrangiana, e um fortalecimento da formulação, acrescentando mais restrições, os autores conseguem resolver o problema. O problema apresenta um número grande, mas finito de pontos em que as máquinas podem ser instaladas. Os autores testaram os algoritmos em dois conjuntos diferentes de dados, em que o primeiro apresenta um problema mais simples e o segundo um problema mais complexo, baseado em dados reais.

Najafi e Richards (2013) apresentam um modelo de otimização de PLIM para desenhar um sistema de acesso que permita a construção de estradas de transporte para camiões. Toda a madeira deve ser transportada de locais de colheita para nodos de saída que façam a ligação entre a rede de estradas florestais e as estradas principais. A função objetivo minimiza o custo total de construção de estradas, manutenção, esporos de derrapagem e transporte geral na floresta.

## 2. CASO DE ESTUDO

### 2.1. Área em estudo

O problema em estudo surge do projeto *Alterfor*, em colaboração com o Instituto Superior de Agronomia (ISA) com a Associação Florestal do Vale do Sousa (AFVS). Este projeto é financiado pelo programa Horizonte 2020 da União Europeia e estuda modelos de gestão florestal alternativos utilizados atualmente, procurando otimizá-los em diferentes países europeus. Segundo o site oficial da *Alterfor*, o projeto destaca o principal objetivo de fornecer novas e melhoradas abordagens de gestão florestal que sejam suficientemente sólidas para enfrentar os desafios do século XXI, nomeadamente as alterações climáticas e a dinâmica dos mercados globais que estão em crescente evolução, bem como as pressões para o aumento do uso da bioenergia (Eriksson, 2020).

O trabalho está a ser desenvolvido em dez casos de estudo que representam diferentes práticas de gestão florestal e condições sócio ecológicas predominantes na Europa. As áreas dos casos de estudo encontram-se na Alemanha, Itália, Irlanda, Lituânia, Países Baixos, Portugal, Eslováquia, Suécia e Turquia. Portugal é representado pela Associação Florestal do Vale do Sousa (AFVS) e pelo Centro de Estudos Florestais (CEF).

A AFVS é uma instituição privada sem fins lucrativos, fundada em 30 de março de 1994, cuja área de atuação abrange os 6 concelhos do Vale do Sousa: Felgueiras, Lousada, Paredes, Penafiel, Paços de Ferreira, Castelo de Paiva.

A área de estudo localiza-se no Nordeste de Portugal e cobre a parte Sul do Vale do Sousa e estende-se por 14 837 hectares, 2 182 povoamentos; contendo a Zona de Intervenção Florestal (ZIF) entre Douro e Sousa, e a ZIF Paiva. Devido aos incêndios de deflagraram entre 2012 e 2017, cerca de 43% da área de estudo ardeu, o que corresponde a cerca de 6422 hectares, como se pode verificar na tabela 1.

Tabela 1 - Incêndios entre 2012 e 2017, em Portugal.

Ano do fogo	Área ardida (ha)	Área ardida (%)
<b>2012</b>	421	2.84
<b>2013</b>	322	2.17
<b>2015</b>	11	0.07
<b>2016</b>	1706	11.50
<b>2017</b>	2963	26.71
<b>Total</b>	6422	43.29

As florestas cobrem mais de um terço de Portugal, cerca de 3,2 milhões de hectares, sendo o oitavo país com uma maior ocupação de florestas na Europa. O setor florestal representa 3% do produto interno bruto e 12% das exportações, reconhecendo-se ainda o valor paisagístico. No entanto, Portugal tem a maior incidência de incêndios na bacia do Mediterrâneo.

O risco de incêndio e a propagação dependem da cobertura e estrutura de combustível do sub-bosque. Segundo Botequim *et al.* (2017), as estatísticas indicam que os suportes de eucalipto (*Eucalyptus globulus Labill*) e pinho marítimo (*Pinus pinaster Ait*) são tipos de cobertura florestal

inflamáveis que dominam o norte e centro de Portugal, representando 35,9% e 41,3% da floresta queimada, respetivamente. Se a cobertura da floresta de pinheiros resulta em maior risco de incêndios, a floresta mista corresponde a áreas mais desejáveis para a prevenção de incêndios. No entanto, a floresta mista é pouco comum em Portugal, correspondendo a uma área de 16% do total da floresta.

As estradas florestais desempenham um papel fundamental nas atividades de combate a incêndio. Apesar desse importante papel, as estradas florestais são frequentemente planeadas e construídas sem considerar a sua utilidade no combate a incêndios, apesar da sua importância para a proteção e prevenção de incêndios florestais. As estradas florestais não só permitem o acesso à área florestal, como também permitem o transporte de madeira e a mobilidade das máquinas utilizadas para a colheita de madeira.

A construção de estradas florestais tem sido o principal ponto de discórdia nas discussões entre silvicultores e ambientalistas (Gumus, Acar, and Toksoy 2008). A principal crítica deste último é que a construção de estradas florestais provoca a destruição do meio ambiente, a erosão precoce do solo, a perda de habitats e a consequente redução da biodiversidade, bem como a degradação da paisagem natural. No entanto, no contexto do desenvolvimento sustentável da floresta, o uso de recursos naturais e renováveis é um elemento-chave no desenvolvimento ambiental equilibrado e favorável (UNCED, 1992). Uma vez que o uso de recursos depende da acessibilidade das áreas relevantes, a construção de redes de estradas florestais é necessária, mas deve ser refletida cuidadosamente, de forma a minimizar o prejuízo ambiental.

Todas as operações de exploração de madeira têm as seguintes fases (Schiess and Krogstad, 2007):

1. Abate/desmatamento/derrubada - corte de árvores;
2. *Yarding* – agrupamento dos toras num determinado lugar;
3. Carregamento – carregamento dos troncos para serem transportados;
4. Transporte – transporte para a fábrica (geralmente de camião).

Como foi supramencionado, a construção de estradas é um elemento crucial para a proteção e gestão da floresta, independentemente dos seus objetivos principais. No entanto, a construção de estradas florestais é, por vezes, um tema controverso, devido ao seu potencial grande impacto ambiental (Marchi *et al.* 2018). De acordo com o autor, as alterações climáticas e o crescente aumento de procura dos produtos florestais, exige uma avaliação das operações florestais em termos de sustentabilidade. Neste contexto, é importante compreender as variáveis essenciais para que as operações florestais promovam um bem-estar social, económico e ambiental, no futuro.

## **2.2. Descrição do problema**

Neste estudo é considerado um problema de gestão florestal, em que é necessário tomar decisões sobre as prescrições (tratamento, desbaste e corte de árvores) a aplicar ao longo de um horizonte temporal, incluindo o agendamento do corte e colheita de árvores, bem como do transporte da madeira para fora da floresta. O transporte de madeira implica a construção de estradas, a definição dos locais de carregamento da madeira e o transporte para as estradas municipais e nacionais.

De modo a obter soluções foram desenvolvidos modelos de programação linear inteira mista.

As florestas são compostas por várias UG ou talhões, representadas por polígonos no mapa. Para cada UG, a área e as espécies das árvores existentes são conhecidas, tal como as prescrições de cada espécie de árvore. Cada polígono é delimitado por vértices e segmentos onde existem ou podem ser construídas estradas. As árvores presentes na área em estudo são o pinheiro bravo (PB), o eucalipto (EC) e o carvalho (CT).

O horizonte temporal é dividido em períodos de vários anos. Geralmente, considera-se um horizonte temporal de 100 anos, com períodos de 10 anos de forma a manter intervalos de tempo razoáveis.

A madeira é carregada nos vértices dos polígonos e transportada por camiões que viajam através dos segmentos de estrada construídos. Estes segmentos de estradas existem num determinado período se a estrada tiver sido construída nesse período ou construída anteriormente e sofrido manutenções.

Os custos de construção de estradas de manutenção de estrada são conhecidos, bem como os custos operacionais. Tanto os custos de transporte como os custos de carregamento de madeira são proporcionais à quantidade de madeira em causa.

De forma sumária, as decisões que devem ser consideradas são:

- As prescrições a adotar para cada espécie em cada UG, determinando-se assim as UG a serem colhidas, bem como as quantidades de produção de madeira;
- As estradas a serem construídas e/ou mantidas em cada período;
- Os locais de carregamento da madeira;
- As rotas de transporte de madeira, das UG para os destinos.

Estas decisões devem ter em conta o benefício associado às prescrições (*Net Present Value*, incorporando o lucro que se obtém com a venda da madeira) e também o custo associado à remoção da madeira da floresta, nomeadamente, construção e manutenção de estradas, carregamento e transporte de madeira. Se as prescrições já tiverem sido determinadas, o objetivo é minimizar o custo total.

Decisões como a quantidade de madeira a ser armazenada do verão para o inverno, a escolha de máquinas florestais de transporte da madeira e tipos de estrada (terra ou gravilha) não são consideradas neste trabalho.

Outras questões que podem ser consideradas são as restrições de adjacência, para evitar o corte de todas as árvores de uma área, e indicadores como o valor do solo, produção total de madeira em cada período, *stock* de madeira no fim do período, a retenção de carbono e indicadores especiais de biodiversidade, entre outros.

### **2.3. Objetivos do estudo**

Na gestão florestal, a tomada de decisões é muito importante e existem várias possibilidades para resolver um problema. No caso em estudo, serão consideradas duas abordagens: o modelo sequencial e o modelo integrado.

No modelo sequencial, é tomada uma decisão sobre o corte das árvores e só depois é tomada a decisão sobre o transporte sendo assim considerados dois modelos independentes; no modelo integrado, as decisões são tomadas em simultâneo e existe um único modelo, em que a quantidade de madeira a colher vai depender de outras decisões. Pretende-se avaliar e comparar estas duas abordagens: integrada e sequencial. Pretende-se avaliar a possibilidade de obter soluções ótimas ou de boa qualidade para o problema florestal descrito. Uma vez que este é um problema difícil, pretende-se avaliar e comparar duas abordagens: o modelo sequencial e o modelo integrado.

### 3. Metodologia

Para o problema anteriormente descrito, consideram-se modelos em programação linear inteira mista. Como referido anteriormente, foram desenvolvidos modelos correspondentes às duas abordagens: integrado e sequencial. Os modelos são resolvidos com recurso a um solver comercial de programação linear inteira mista.

Para avaliar os modelos consideram-se dois conjuntos de instâncias:

i) um conjunto de instâncias reais que correspondem a porções da floresta descrita no caso de estudo;

ii) um conjunto de instâncias simuladas, baseadas nos dados reais do caso de estudo. Estas instâncias são usadas para avaliar o impacto da relação VAL/custos de remoção da madeira no desempenho dos modelos.

A componente prática do trabalho é suportada por uma componente de revisão bibliográfica extensiva sobre modelos operacionais, táticos e estratégicos de exploração de zonas florestais. Os dados disponibilizados foram analisados, combinando modelos de planeamento florestal e técnicas de investigação operacional e de otimização, que serão explanados posteriormente.

Foram obtidos resultados pela resolução de dois modelos, um integrado e um sequencial. Como supramencionado, o modelo integrado considera as decisões sobre prescrições e remoção da madeira, de acordo com o problema descrito. Por outro lado, o modelo sequencial toma duas decisões de forma separada – primeiro decide sobre as melhores prescrições para maximizar o valor atual líquido, e depois considera as decisões sobre a construção e manutenção de estradas, carregamento e transporte de madeira.

Estes modelos permitiram comparar as diferentes opções de gestão, através da análise dos vários parâmetros relevantes. Os principais objetivos são comparar as duas abordagens em termos de qualidade de solução e desempenho na resolução. Os modelos são formulados em programação linear inteira mista, sendo considerados indicadores como o valor total (*Total\_Value*), que representa o lucro da venda da madeira; os custos operacionais, que abrangem os custos relacionados com a construção e manutenção de estradas e os custos do carregamento e do transporte da madeira cortada para o exterior da floresta; o *gap*, que é tanto maior quanto maior for a distância entre o majorante e o valor da solução ótima.

Foram extraídos os seguintes parâmetros: valor total (*Total\_Value*), NPV (valor líquido atualizado), custos de construção e manutenção de estradas e transporte e carregamento de madeira ou custos totais (*Total\_Road\_Load\_Trans*), o tempo (em segundos) e o *gap* (em %). O programa utilizado para solucionar o problema foi um solver de Programação Inteira (FICO® Xpress Optimization), uma linguagem que permite a modelação e resolução de problemas.

Pretende-se a comparação dos modelos, tendo em conta a relação entre os parâmetros obtidos, tal como o tempo de processamento, o *gap* e a receita obtida.

### 3.1. Modelos

O modelo integrado considera as decisões das prescrições e do corte da madeira, de acordo com o problema descrito, bem como as decisões de construção de estrada, dos locais de carregamento da madeira e de transporte

O modelo sequencial, considerado para o problema em estudo, decompõe-se em dois submodelos. No primeiro decide-se as prescrições a aplicar a cada espécie de cada UG, no segundo assume que as decisões sobre as prescrições já foram tomadas, pelo que as quantidades de madeira produzida em cada unidade de gestão já são conhecidas *a priori*. Assim sendo, este modelo considera apenas a construção e manutenção de estradas, bem como o carregamento e transporte de madeira, sendo o objetivo minimizar o custo total.

Em seguida, é apresentada a formulação dos modelos matemáticos:

#### Parâmetros

- $U$  é o conjunto das unidades de gestão (UG).
- $VP$  é o conjunto dos vértices das unidades de gestão  
 $VP(u) \subseteq VP$  é o conjunto de vértices da unidade de gestão  $u$ .
- $VE$  é o conjunto dos vértices de estrada (municipal ou nacional).
- $VQ$  é o conjunto dos vértices de passagem.
- $V$  é o conjunto de todos os vértices.  $V = VP + VE + VQ$
- $E$  é o conjunto de potenciais segmentos de estrada  $\{i, j\} \in E$ , se for possível construir ou manter uma estrada entre os vértices  $i$  e  $j$ , em que  $i, j \in V$ . Considera – se um grafo não orientado  $GV = (V, E)$
- $AU = \{(u, i): u \in U, i \in VP(u)\}$ .
- $AV \subseteq (V \setminus VE) \times V$  tal que  $(i, j) \in E$  e  $i \in V \setminus VE$ .
- $AU$  e  $AV$  são o conjunto de arcos. Considera – se o grafo orientado  $G = (N, A)$  onde  $N = U \cup V$  e  $A = AU \cup AV$ .

#### Custos

- $CRB_{ij}$  é o custo em € de construção da estrada  $\{i, j\} \in E$ .
- $CRM_{ij}$  é o custo em € da manutenção da estrada  $\{i, j\} \in E$ .
- $CT_{ij}$  é o custo em € por tonelada do transporte na estrada  $\{i, j\} \in E$ .
- $CL_i$  é o custo em € por tonelada do carregamento florestal no vértice  $i \in VP$ .
- $\alpha$  é a taxa de desconto, constante, para um ano. Os custos  $CRB_{ij}^t, CRM_{ij}^t, CT_{ij}^t, CL_{ij}^t$  são versões com desconto dos custos de construção e manutenção de estradas, transporte e carregamento. São obtidas multiplicando o valor atual por  $(1 + \alpha)^{(5-10t)}$ , para períodos de 10 anos.

Assume-se que a distância de qualquer ponto de saída para o destino final é a mesma, sendo que o custo de transporte de madeira é proporcional à distância e quantidade. Acrescenta-se que o custo do carregamento da madeira é também proporcional à quantidade de madeira. Por estas razões, estes custos não são considerados no modelo.

### Prescrições:

$T = \{t = 1, \dots, |T|\}$  é o horizonte do planeamento temporal de períodos de 10 anos.

- $S(u)$  é o conjunto de espécies de árvores da unidade de gestão  $u \in U$ .
- $P$  é o conjunto de todas as prescrições.  $P(s, u)$  é o conjunto de prescrições para as espécies  $s \in S(u)$  na unidade de gestão  $u \in U$ .
- O conjunto de espécies em estudo são o pinheiro bravo (PV), o eucalipto (EC) e o carvalho (CT).
- $NPV_{usp}$  é o valor presente líquido em €, obtido se a prescrição  $p \in P$  é usada na espécie  $s$  da unidade de gestão  $u$ .
- $MAD_{usp}^t$  é a quantidade de madeira em toneladas da espécie  $s$  colhida no período  $t$  na unidade de gestão  $u$ , se a prescrição  $p$  é usada.
- $MADM_u^t = \sum_{s \in S(u)} \max_{p \in P(s, u)} MAD_{usp}^t$   
é a quantidade máxima de madeira que pode ser colheita no período  $t$  na unidade de gestão  $u$ , se qualquer prescrição for usada.
- $MADT^t = \sum_{u \in U_G} MADM_u^t$   
é a quantidade máxima de madeira colheita no período  $t$  em todas as unidades de gestão.

### 3.1.1. Modelo Integrado

#### Variáveis

$z_{usp} \begin{cases} 1 & \text{se a prescrição } p \text{ para a espécie } s \text{ é destinada à unidade de gestão } u \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$

$$u \in U, s \in S(u), p \in P(s, u)$$

$w_{ij}^t \begin{cases} 1 & \text{se a estrada } \{i, j\} \text{ é construída no período } t \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}, \{i, j\} \in E, t = 1, \dots, |T|$

$y_{ij}^t \begin{cases} 1 & \text{se a estrada } \{i, j\} \text{ é mantida no período } t \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}, \{i, j\} \in E, t = 1, \dots, |T|$

$f_{ij}^t = \text{fluxo de madeira, em toneladas, no arco } (i, j), (i, j) \in AV, t = 1 \dots |T|$

$f_{ui}^t = \text{fluxo de madeira, em toneladas, da UG } u, \text{ carregado}$

$\text{no vértice } i \text{ no período } t, (u, i) \in AU, t = 1 \dots |T|$

## Função Objetivo

$$\begin{aligned}
 (4.1) \quad VI = \max & \sum_{u \in U} \sum_{s \in S, p \in P(s,u)} NPV_{usp} z_{usp} \\
 & - \sum_{t=1 \dots |T|} \sum_{\{i,j\} \in E} CRB_{ij}^t w_{ij}^t \\
 & - \sum_{t=1 \dots |T|} \sum_{\{i,j\} \in E} CRM_{ij}^t y_{ij}^t \\
 & - \sum_{t=1 \dots |T|} \sum_{\{u,i\} \in AU} CL_i^t f_{ui}^t \\
 & - \sum_{t=1 \dots |T|} \sum_{(i,j) \in AV} CT_{ij}^t f_{ij}^t
 \end{aligned}$$

Na função objetivo, pretende-se assim maximizar o NPV, descontando todas as despesas de construção de estradas, manutenção de estradas, localização do equipamento florestal e transporte de madeira.

## Restrições

$$(4.2) \quad \sum_{p \in P(s,u)} z_{usp} \leq 1 \quad s \in S(u), u \in U$$

$$(4.3) \quad \sum_{i:(u,i) \in AU} f_{ui}^t = \sum_{s \in S, p \in P(s,u)} MADT_{usp}^t z_{usp} \quad u \in U, t = 1 \dots |T|$$

$$(4.4) \quad \sum_{u:(u,i) \in AU} f_{ui}^t + \sum_{j:(j,i) \in AV} f_{ji}^t = \sum_{j:(i,j) \in AV} f_{ij}^t, \quad i \in V \setminus VE, t = 1 \dots |T|$$

$$(4.5) \quad f_{ij}^t + f_{ji}^t \leq MADT^t (w_{ij}^t + y_{ij}^t), \quad \{i,j\} \in E, j \in V \setminus VE, t = 1 \dots |T|$$

$$(4.6) \quad f_{ij}^t \leq MADT^t (w_{ij}^t + y_{ij}^t), \quad \{i,j\} \in E, j \in VE, t = 1 \dots |T|$$

$$(4.7) \quad y_{ij}^t \leq w_{ij}^{t-1} + y_{ij}^{t-1}, \quad \{i,j\} \in E, t = 1 \dots |T|$$

$$\begin{cases} y_{ij}^0 = 0, w_{ij}^0 = 1 \text{ se a estrada } \{i,j\} \text{ existe no início do horizonte temporal} \\ w_{ij}^0 = 0 \text{ caso contrário} \end{cases}$$

$$(4.8) \quad z_{usp} \in \{0,1\} \quad p \in P(u), s \in S, u \in U$$

$$(4.9) \quad w_{ij}^t, y_{ij}^t \in \{0,1\}, \quad \{i,j\} \in E, t = 1 \dots |T|$$

$$(4.10) \quad f_{ui}^t \geq 0, \quad (u,i) \in AU, t = 1 \dots |T|$$

$$(4.11) \quad f_{ij}^t \geq 0, \quad (i,j) \in AV, t = 1 \dots |T|$$

O conjunto de restrições (4.2) garantem que para cada espécie  $s$  da unidade de gestão  $u$  pode haver no máximo uma prescrição  $p$  durante todo o horizonte temporal. O fluxo de madeira de uma unidade de gestão  $u$ , no período  $t$ , é igual ao somatório da quantidade de madeira das espécies  $s$  colhidas num período  $t$  em  $u$ , se a prescrição  $p$  é usada (4.3.).

Em cada período, o fluxo de madeira que entra num vértice  $i \in V \setminus VE$  é igual ao fluxo que sai do vértice (4.4.). As restrições (4.5) fazem a ligação entre as variáveis de fluxo  $f_{ij}^t$  e as variáveis  $w_{ij}^t$  e  $y_{ij}^t$  assegurando que, em cada período, a madeira é transportada por estradas mantidas ou construídas nesse período. As estradas que forem mantidas no período  $t$  devem ter sido construídas ou mantidas no período  $t - 1$  (4.7.).

Existem algumas variáveis binárias nas restrições. Se uma dada prescrição  $p$  for destinada à espécie  $s$  na UG  $u$ , a variável  $z_{usp}$  assume o valor 1; caso contrário assume o valor 0 (4.8.). Para cada período de tempo, uma estrada pode ser construída ou mantida, assumindo a variável o valor 1; caso contrário, a variável assume o valor 0 (4.9.). O fluxo de madeira, em toneladas, no arco  $(i, j)$ , no período  $t$ , é sempre maior ou igual a 0 (4.10 e 4.11).

As variáveis de fluxo podem ser desagregadas de forma a melhorar o desempenho dos softwares de resolução (Magnanti & Wolsey, 1995).

$$f_{ij}^{ut} = \text{fluxo de madeira em toneladas, da UG } u \text{ no período } t, \text{ no arco } (i, j),$$

$$u \in U, (i, j) \in AV, t = 1 \dots |T|$$

Verifica-se a relação  $f_{ij}^t = \sum_{u \in U} f_{ij}^{ut}$ . As restrições seguintes substituem as restrições (4.4), (4.5), (4.6) e (4.7). Nos modelos implementados, são usadas as variáveis de fluxo desagregadas.

$$(4.12) \quad f_{ui}^t + \sum_{j:(j,i) \in AV} f_{ji}^{ut} = \sum_{j:(i,j) \in AV} f_{ij}^{ut}, \quad u \in U, i \in V \setminus VE, T = 1 \dots |T|$$

$$(4.13) \quad f_{ij}^{ut} + f_{ji}^{ut} \leq MADM^t (w_{ij}^t + y_{ij}^t), \quad u \in U, \{i, j\} \in E, i \in V \setminus VE, t = 1 \dots |T|$$

$$(4.14) \quad f_{ij}^{ut} \leq MADM^t (w_{ij}^t + y_{ij}^t), \quad u \in U, \{i, j\} \in E, i \in VE, t = 1 \dots |T|$$

$$(4.15) \quad f_{ij}^{ut} \geq 0, \quad u \in U, (i, j) \in AU, t = 1 \dots |T|$$

### 3.1.2. Modelo Sequencial

Uma vez que o Modelo integrado é muito difícil de resolver, uma abordagem comum para obter soluções admissíveis consiste em decompor em dois submodelos:

No primeiro, pretende-se determinar uma prescrição para cada UG. Pode considerar-se a prescrição para cada UG  $u$  que maximiza  $NPV_{usp}$  para  $p \in P(u)$ .

#### Função Objetivo

$$(4.16) \quad NPV = \max \sum_{u \in U} \sum_{s \in S, p \in P(s, u)} NPV_{usp} z_{usp}$$

Na função objetivo, pretende-se maximizar o VAL ( $VAL = NPV$ ).

### Restrições

$$(4.17) \quad \sum_{p \in P(s,u)} z_{usp} \leq 1 \quad s \in S(u), u \in U$$

$$(4.18) \quad MAD_u^t = \sum_{s \in S, p \in P(s,u)} MAD_{usp}^t z_{usp} \quad u \in U, t = 1 \dots |T|$$

$$(4.19) \quad z_{usp} \in \{0,1\} \quad p \in P(u), s \in S, u \in U$$

$MAD_u^t$  é, neste modelo, uma variável que contabiliza a quantidade de madeira produzida na unidade de gestão  $u$  no período  $t$ . O seu valor será considerado no modelo seguinte como um dado de entrada. No segundo submodelo, assume-se que as prescrições para cada UG são conhecidas.

- $MAD_u^t$  é a quantidade de madeira, em toneladas, colheita no período  $t$  na UG  $u$ .
- $MADT^t = \sum_{u \in UG} MAD_u^t$  é a quantidade de madeira colhida no período  $t$  em todas as UG.

### Função Objetivo

$$(4.20) \quad CO = \min \sum_{t=1 \dots |T|} \sum_{\{i,j\} \in E} CRB_{ij}^t W_{ij}^t + \sum_{t=1 \dots |T|} \sum_{\{i,j\} \in E} CRM_{ij}^t \gamma_{ij}^t + \sum_{t=1 \dots |T|} \sum_{\{u,i\} \in AU} CL_i^t f_{ui}^t + \sum_{t=1 \dots |T|} \sum_{(i,j) \in AV} CT_{ij}^t f_{ij}^t$$

### Restrições

$$(4.21) \quad \sum_{i:(u,i) \in AU} f_{ui}^t = MAD_u^t \quad u \in U, t = 1 \dots |T|$$

$$(4.22) \quad \sum_{u:(u,i) \in AU} f_{ui}^t + \sum_{j:(j,i) \in AV} f_{ji}^t = \sum_{j:(i,j) \in AV} f_{ij}^t, \quad i \in V \setminus VE, t = 1 \dots |T|$$

$$(4.23) \quad f_{ij}^t + f_{ji}^t \leq MADT^t (w_{ij}^t + y_{ij}^t), \quad \{i,j\} \in E, j \in V \setminus VE, t = 1 \dots |T|$$

$$(4.24) \quad f_{ij}^t \leq MADT^t (w_{ij}^t + y_{ij}^t), \quad \{i,j\} \in E, j \in VE, t = 1 \dots |T|$$

$$(4.25) \quad y_{ij}^t \leq w_{ij}^{t-1} + y_{ij}^{t-1}, \quad \{i,j\} \in E, t = 1 \dots |T|$$

$$\begin{cases} y_{ij}^0 = 0, w_{ij}^0 = 1 \text{ se a estrada } \{i,j\} \text{ existe no início do horizonte temporal} \\ w_{ij}^0 = 0 \text{ caso contrário} \end{cases}$$

$$(4.26) \quad w_{ij}^t, y_{ij}^t \in \{0,1\}, \quad \{i,j\} \in E, t = 1 \dots |T|$$

$$(4.27) \quad f_{ui}^t \geq 0, \quad (u,i) \in AU, t = 1 \dots |T|$$

$$(4.28) \quad f_{ij}^t \geq 0, \quad (i,j) \in AV, t = 1 \dots |T|$$

O melhoramento das restrições (4.23) e (4.24) com variáveis do fluxo desagregadas:

$$f_{ij}^{ut} = \text{fluxo de madeira em toneladas, da UG } u \text{ no período } t, \text{ no arco } (i, j),$$

$$u \in U, (i, j) \in AV, t = 1 \dots |T|$$

As restrições seguintes substituem as restrições (4.22), (4.23), (4.24) e (4.28).

$$(4.29) \quad f_{ui}^t + \sum_{j:(j,i) \in AV} f_{ji}^{ut} = \sum_{j:(i,j) \in AV} f_{ij}^{ut}, \quad u \in U, i \in V \setminus VE, T = 1 \dots |T|$$

$$(4.30) \quad f_{ij}^{ut} + f_{ji}^{ut} \leq MAD_u^t (w_{ij}^t + y_{ij}^t), \quad u \in U, \{i, j\} \in E, i \in V \setminus VE, t = 1 \dots |T|$$

$$(4.31) \quad f_{ij}^{ut} \leq MAD_u^t (w_{ij}^t + y_{ij}^t), \quad u \in U, \{i, j\} \in E, i \in VE, t = 1 \dots |T|$$

$$(4.32) \quad f_{ij}^{ut} \geq 0, \quad u \in U, (i, j) \in AU, t = 1 \dots |T|$$

O limite  $MAD_u^t$  nas variáveis  $f_{ij}^{ut}$  é o melhor possível de momento.

Assim, o valor ótimo do modelo sequencial é dado por:

$$(4.33) \quad VS = NPV - CO$$

### 3.2. Indicadores dos modelos

De forma a ser possível a comparação dos dois modelos, são definidos indicadores que permitem realizar um estudo comparativo entre o modelo sequencial e o modelo integrado.

No modelo sequencial admitimos que a determinação da prescrição que maximiza o VAL é resolvida de forma ótima. De facto, este problema resolve-se facilmente escolhendo para UG e espécie a prescrição com maior VAL.

Considere-se uma instância do problema e os modelos integrado (I) e sequencial (S), sendo VI e VS os respetivos valores ótimos que se assumem positivos. Tem-se que:

$$(4.34) \quad VI \geq VS > 0$$

O valor ótimo do valor integrado é sempre melhor ou igual ao valor ótimo do modelo sequencial, uma vez que as decisões são tomadas com o objetivo de obter o maior benefício global possível, enquanto que o modelo sequencial é condicionado pela decisão sobre as prescrições que visa a obtenção do maior NPV possível, sendo depois tomadas as decisões sobre o transporte e carregamento de madeira e construção de estradas, que têm custos elevados associados.

Consideram-se vários parâmetros essenciais para o estudo e análise dos resultados. O parâmetro D é desvio do valor ótimo do modelo sequencial, relativamente ao modelo integrado e é dado pela expressão  $D = \frac{VI - VS}{VI}$ . Mede em termos percentuais, o que se perde por usar o modelo sequencial em vez do integrado, admitindo que é possível resolver otimamente ambos os modelos. Chamamos a D o desvio real.

Uma vez que as soluções obtidas são soluções admissíveis e não soluções necessariamente ótimas, pretende-se obter um valor estimado para o desvio real, dado pelo

parâmetro E, que mede em termos percentuais, o que se perde por usar o modelo sequencial em vez do integrado, admitindo que não é possível resolver otimamente ambos os modelos.

Sejam WI e WS os valores das melhores soluções admissíveis obtidas para a mesma instância com os modelos I e S, respetivamente, e assumam-se que são positivos.

O desvio calculado E é uma aproximação do desvio D e é dado pelo quociente da diferença entre valor da melhor solução admissível para o modelo integrado e o valor da melhor solução admissível para o modelo sequencial pelo valor da solução admissível do modelo integrado.

$$(4.35) \quad E = \frac{WI - WS}{WI}$$

Também é possível calcular os desvios para os indicadores NPV e custos operacionais a partir das seguintes expressões:

$$\frac{NPV \text{ do modelo integrado} - NPV \text{ do modelo sequencial}}{NPV \text{ do modelo integrado}}$$

$$\frac{Custos \text{ do modelo integrado} - Custos \text{ do modelo sequencial}}{Custos \text{ do modelo integrado}}$$

O parâmetro E pode ser usado como aproximação do desvio real D. De seguida apresenta-se um intervalo para o valor (desconhecido) de D, com base no desvio E e nos *gaps* dos modelos sequencial e integrado.

A solução ótima é obtida através do método *branch and bound*, que é baseado no princípio de que um conjunto de soluções admissíveis é dividido em pequenos subconjuntos de soluções, que são avaliadas de forma sistemática até a melhor solução ser encontrada. Por vezes, o tempo limite de processamento não é suficiente para chegar à solução ótima. No entanto o algoritmo em geral termina com uma solução admissível e um majorante para o valor ótimo.

Sejam MI e MS os valores dos melhores majorantes conhecidos para os modelos integrado e sequencial. Tem-se que:

$$(4.36) \quad 0 < WI \leq VI \leq MI$$

$$(4.37) \quad 0 \leq WS \leq VS \leq MS,$$

Os *gaps* correspondentes aos modelos sequencial e integrado, de acordo com o solver *xpress optimization*, são obtidos através de quocientes. O *GapI* (*gap* do modelo integrado) é dado pelo quociente da diferença entre o majorante e o valor da melhor solução admissível para o modelo integrado pelo valor da melhor solução admissível para o modelo integrado. O *GapS* (*gap* do modelo sequencial) é dado pelo quociente da diferença entre o majorante e o valor da melhor solução admissível para o modelo sequencial pelo valor da melhor solução admissível para o modelo sequencial.

As expressões são as seguintes:

$$(4.38) \quad GapI = \frac{MI - WI}{WI} \text{ e } GapS = \frac{MS - WS}{WS}$$

O desvio real é o desvio assumindo que temos o *gap* com 0%. Quanto mais reduzido for o valor *gap*, mais próximos estaremos, à partida, da melhor solução. Para os casos em que *gap* > 0, é definido um intervalo para o desvio real, calculados com base no valor total obtido.

Proposição: um intervalo para o desvio real  $D$  é definido por:

$$(4.39) \quad \max\{E - \frac{WS}{WI} * GapS, 0\} \leq D \leq E + \frac{WS}{WI} * GapI.$$

Prova: Tem-se que  $D = 1 - \frac{VS}{VI}$  e  $E = 1 - \frac{WS}{WI}$ .

$$(4.40) \quad \begin{aligned} \text{a) } E - \frac{WS}{WI} * GapS &\leq D: \\ \frac{VS}{VI} &\leq \frac{MS}{WI} = \frac{WS + MS - WS}{WI} = \\ &= \frac{WS}{WI} + \frac{MS - WS}{WI} = \\ &= \frac{WS}{WI} + \frac{WS}{WI} * \frac{MS - WS}{WS} = \\ &= \frac{WS}{WI} + \frac{WS}{WI} * GapS \end{aligned}$$

Logo  $D = 1 - \frac{VS}{VI} \geq 1 - \frac{WS}{WI} - \frac{WS}{WI} * GapS = E - \frac{WS}{WI} * GapS$ .  
Como  $D \geq 0$ , o desvio real satisfaz  $D \geq \max\{E - \frac{WS}{WI} * GapS, 0\}$

$$(4.41) \quad \begin{aligned} \text{b) } D &\leq E + \frac{WS}{WI} * GapI: \\ \frac{VS}{VI} &\geq \frac{WS}{MI} = \frac{WS}{WI} + \frac{WS}{MI} - \frac{WS}{WI} = \\ &= \frac{WS}{WI} + \frac{WS * WI - WS * MI}{MI} * \frac{1}{WI} = \\ &= \frac{WS}{WI} + \frac{WS}{WI} * \frac{WI - MI}{MI} \geq \frac{WS}{WI} + \frac{WS}{WI} * \frac{WI - MI}{WI} = \\ &= \frac{WS}{WI} - \frac{WS}{WI} * GapI \end{aligned}$$

Logo  $D = 1 - \frac{VI}{VS} \leq 1 - \frac{WS}{WI} + \frac{WS}{WI} * GapI = E + \frac{WS}{WI} * GapI$ ,

Obtém-se assim a fórmula para calcular o desvio, como queria demonstrar.

Importa referir que o ponto médio (PM) do intervalo também pode ser usado como estimativa para o desvio  $D$ .

Os *gaps* e o tempo de processamento do problema são dois indicadores essenciais, sendo que se pretende obter boas soluções para o problema ( $gap \leq 0,1$ ) no menor tempo possível.

### 3.3. Exemplos Ilustrativos

A título de exemplo, foi escolhida a instância  $F10\_1\_1$ , para os quatro períodos considerados, para projetar visualmente a solução do problema, uma vez que é uma instância com um menor conjunto de dados. A solução para esta instância foi obtida através do modelo integrado, em que as decisões de corte e transporte são tomadas simultaneamente. Verificou-se que a solução obtida para o modelo sequencial foi exatamente a mesma, com os mesmos valores e com as mesmas decisões de corte e transporte da madeira para os 4 períodos.

Para o efeito da representação visual, foram extraídas informações sobre os carregamentos para os respetivos vértices, quais os segmentos de estradas a construir (em que período), quais as estradas a manter (e em que período) e quais os respetivos custos.

Esta instância é composta por 10 UG, 19 vértices, dos quais 2 vértices de estrada e 28 segmentos em que podem ser construídas / mantidas estradas.

As indicações a azul correspondem a operações realizadas pela primeira vez nesse período (construção de estradas/carregamento de madeira). As indicações representadas a amarelo indicam as operações que também foram realizadas no período anterior. A figura 7 ilustra a solução ótima do problema para a instância  $F10\_1\_1$ , no modelo integrado.

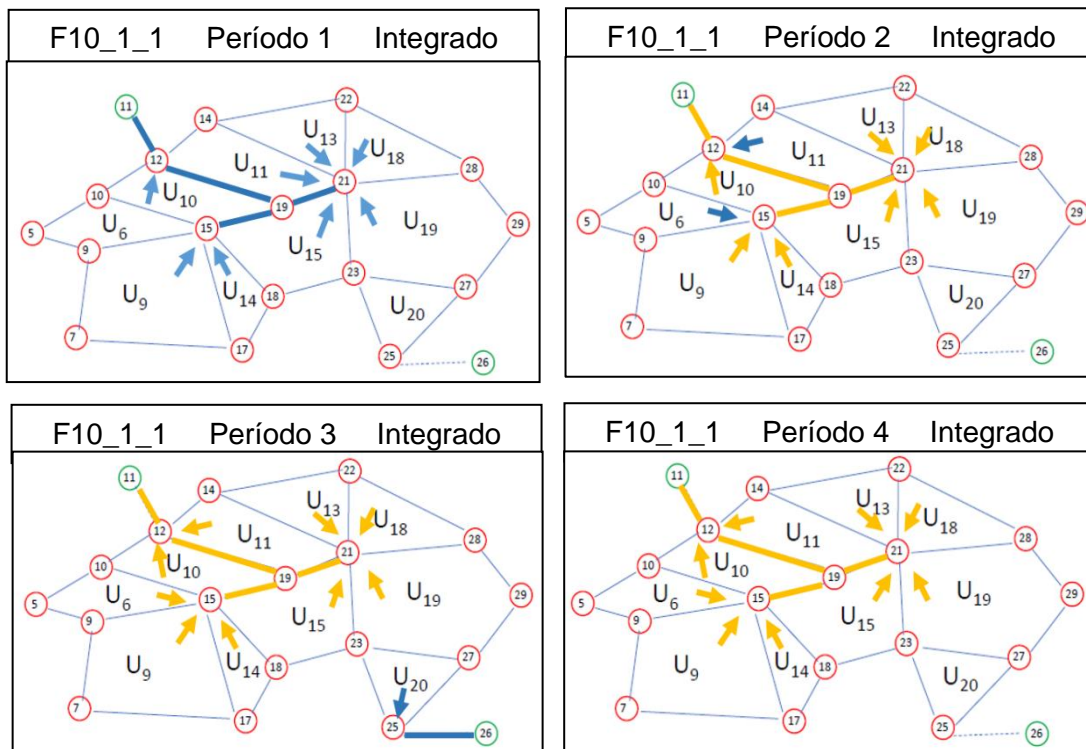


Figura 7 - Representação gráfica do modelo integrado para  $F10\_1\_1$

A partir da análise gráfica das soluções obtidas, verifica-se que em  $t = 1$  foi transportada madeira das unidades de gestão 9, 10, 11, 13, 14, 15, 18 e 19. De acordo com o modelo integrado, verifica-se que as estradas construídas no período  $t = 1$  foram mantidas ao longo dos 4 períodos. No último período foi é ainda construída a estrada representada pelos vértices (25,26).

Verifica-se que, no final dos 4 períodos, foi transportada madeira de todas as dez UG, como se pretendia.

### 3.4. Instâncias

Pretende-se comparar os dois modelos, tendo em conta a sua resolução por um solver de programação linear inteira mista (FICO® Xpress Optimization)<sup>3</sup> e usando os seguintes indicadores:

- a qualidade das soluções obtidas, em termos de valor da função objetivo;
- o tempo computacional necessário para obter as soluções.

Para o efeito, serão consideradas:

- i) oito instâncias correspondentes a diferentes porções da floresta descrita no caso de estudo;
- ii) baseadas na ilustração do caso de estudo, criaram-se instâncias de menor dimensão fazendo variar custos e parâmetros.

As instâncias reais correspondentes a porções da floresta descrita são oito, denominadas por: clas1, clas4, clas5, clas6, clas7, clas8, clas9 e clas10, variando no número de UG, arestas e vértices. A tabela 2 apresenta uma breve descrição das várias porções de floresta, contemplando o número de UG, arestas e vértices:

Tabela 2 - Características das instâncias reais

Instâncias reais	Quantidade		
	UG	arestas	vértices
clas1	248	4745	4121
clas4	7	99	79
clas5	4	78	74
clas6	15	468	412
clas7	139	2577	2393
clas8	20	786	722
clas9	26	643	582
clas10	11	321	296

Nas instâncias de teste, consideram-se 4 florestas base. A floresta 1 (F10) tem uma área de 20 ha; a floresta 2 (F28A) tem uma área de 330 ha; a floresta 3 (F28B) tem uma área de 108 ha e a floresta 4 (F44) tem uma área de 188 há. A tabela 3 apresenta uma breve descrição das várias instâncias. No anexo 1, encontra-se a representação gráfica das mesmas.

<sup>3</sup> <https://www.fico.com/en/products/fico-xpress-optimization>

Tabela 3 - Características das instâncias de teste

Instâncias teste	Quantidade		
	UG	arestas	vértices
<b>F10</b>	10	28	19
<b>F28A</b>	28	40	13
<b>F28B</b>	28	40	14
<b>F44</b>	44	40	14

Um dos fatores a variar é a relação entre o NPV (a maximizar) e os custos de remoção da madeira da floresta (a minimizar). Pretende-se saber de que forma esta relação pode afetar o desempenho das duas abordagens, isto é, qual será o impacto das diferentes proporções na capacidade de resolução.

Para cada uma das 4 florestas teste foram geradas  $3 \times 4$  instâncias,  $FX_{i,j}$ , sendo  $i = 1, 2, 4$  e  $j = 1, 2, 3, 4$ . Os dados relativos a estas instâncias são gerados de forma a simular os dados reais do caso de estudo. O  $i$  representa o peso do NPV na função objetivo, relativamente aos custos operacionais (CO) de construção e manutenção de estradas, carregamento e transporte. Pretende-se, desta forma, perceber de que forma estas diferentes proporções têm impacto na capacidade de resolução do problema. Assim, a função objetivo é dada, geralmente, pela expressão  $i \times NPV - CO$ .

Será dado destaque à análise das instâncias teste de parâmetro  $i = 1$ , uma vez que estes conjuntos de dados correspondem à situação mais próxima da realidade. O  $j$  identifica a instância gerada de acordo com o que vem a seguir.

Os benefícios e custos têm variações aleatórias relativamente aos valores base de cada floresta (F10, F28A, F28B e F44), representando 4 diferentes realizações das componentes aleatórias. Os parâmetros são gerados aleatoriamente a partir dos seguintes dados determinísticos das várias florestas:

- $CLmin_i$  and  $CLmax_i$  mínimo e máximo do custo (localização) por realizar a colheita no vértice  $i$  em euros/tonelada
- $CRB_{i,j} = CR * DIST(i, j)$  custo de construção de estrada ( $i, j$ )
- $CRM_{i,j} = CM * DIST(i, j)$  custode manutenção da estrada ( $i, j$ )
- $CTP_{i,j} = CT * DIST(i, j)$  custode transporte de 1 tonelada na estrada ( $i, j$ )
- $MADD_{usp}^t$  quantidade de madeira (toneladas) colheita na UG  $u$  no período  $t$  com a prescrição  $p$  para a espécie  $s$
- $i \times NPV_{usp}^t$  valor líquido atual para a UG  $u$  no período  $t$  com a prescrição  $p$  para a espécie  $s$

Sendo  $RND$  um número aleatório entre 0 e 1,  $\alpha = 0.15$  e  $R_{RND} = 1 - \alpha + 2 \times \alpha \times RND$  um número aleatório entre 0.85 e 1.15, os parâmetros gerados (em minúsculas) são:

- $cl_i = CLmin_i + (CLmax_i - CLmin_i) \times RND$
- $crb_{i,j} = CRB_{i,j} \times R_{RND}$

- $crm_{i,j} = CRM_{i,j} \times R_{RND}$

obtendo-se assim:

- $cl_i$  em  $[CLmin_i, CLmax_i]$
- $crb_{i,j}$  em  $[CRB_{i,j}(1 - \alpha), CRB_{i,j}(1 + \alpha)]$
- $crm_{i,j}$  em  $[CRM_{i,j}(1 - \alpha), CRM_{i,j}(1 + \alpha)]$
- $ctp_{i,j}$  em  $[CTP_{i,j}(1 - \alpha), CTP_{i,j}(1 + \alpha)]$
- $madd_{usp}^t$  em  $[MADD_{usp}^t(1 - \alpha), MADD_{usp}^t(1 + \alpha)]$
- $npv_{usp}^t$  em  $[NPV_{usp}^t(1 - \alpha), NPV_{usp}^t(1 + \alpha)]$

## 4. OBTENÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

A análise dos resultados pretende dar uma visão comparativa global e contempla dois momentos diferentes. Este capítulo apresenta várias tabelas síntese para facilitar a visualização e análise dos resultados obtidos. Nos anexos 2, 3, 4 e 5, apresentam-se todas as tabelas construídas para a análise e estudo do problema, para todas as instâncias teste.

Numa primeira fase, pretende-se comparar os modelos integrado e sequencial, tendo em conta os valores do *gap* e do tempo de processamento em função da dimensão das instâncias. Importa referir que cada instância foi analisada no *solver* (FICO® Xpress Optimization - *Xpress IVE Version 1.25.06.64 bit*), num processador *intel core i5-8250U*, 1.6GHz-1.8 GHz, com 8 GB de RAM. Foram introduzidos no software critérios de paragem em ambas as abordagens, nomeadamente, 0,1% para o *gap* e um limite máximo de 3600 segundos para o tempo de execução do programa. Se o *gap* final é inferior ou igual a 0,1% dizemos que o problema está resolvido. Estes limites foram sofrendo alterações ao longo do estudo do problema, de forma a tornar possível realizar testes comparativos entre resultados obtidos. Com efeito, de forma a conseguir uma melhor perceção da influência do tempo de processamento nos resultados, foi aumentado o tempo limite de processamento dos dados para 24000 segundos em algumas instâncias teste previamente selecionadas que apresentavam *gaps* muito elevados. Pretendeu-se estudar 4 períodos para todas as instâncias.

De seguida, são apresentadas as tabelas 4 e 5, que contemplam uma abordagem global dos resultados obtidos nos modelos sequencial e integrado para as instâncias reais e para as instâncias teste.

O valor total representa o valor da função objetivo WI e WS, que neste caso é a maximização do NPV menos os custos operacionais. Os *gaps* obtidos são dados pelas expressões  $GapI = \frac{MI-WI}{WI}$  e  $GapS = \frac{MS-WS}{WS}$ , para o modelo integrado e sequencial, respetivamente.

O tempo máximo de execução diz respeito ao limite temporal introduzido no *solver*, em segundos, de forma a que a solução seja obtida num espaço temporal limitado.

Tabela 4 - Instâncias reais: indicadores valor total, tempo e gap

Instâncias reais	Modelo Sequencial			Modelo Integrado		
	valor total (€)	Tempo (s)	Gap (%)	valor total (€)	Tempo (s)	Gap (%)
clas1	3267791,39	166	0,00%	3273022,99	556	0,09%
clas4	85757,51	1	0,00%	85735,77	1	0,04%
clas5	38018,01	1	0,00%	38018,01	1	0,01%
clas6	221204,11	1	0,00%	221526,72	2	0,00%
clas7	1763239,89	49	0,00%	1769349,42	119	0,09%
clas8	362786,36	4	0,00%	362749,61	2	0,03%
clas9	321084,27	4	0,00%	322310,78	33	0,08%
clas10	153702,94	2	0,00%	153702,94	6	0,08%
MÉDIA	776698,06	28,5	0,00%	778302,03	90	0,05%

A partir da análise da tabela 4, é possível observar que todas as instâncias foram resolvidas, pois terminou por ter atingido um  $gap \leq 0,1\%$ , sendo que o modelo sequencial é geralmente mais rápido e apresenta  $gaps$  menores que o modelo integrado. A instância não é resolvida quando termina por ter atingido o tempo máximo estabelecido.

O modelo integrado obtém melhores soluções, ficando o valor médio das soluções obtidas pelo modelo sequencial a cerca de 0,21% da média dos valores das soluções obtidas para o modelo integrado.

A instância *clas1* é a instância que apresenta um maior tempo de processamento e o maior  $gap$  quando considerado o modelo integrado. Isto justifica-se pelo facto de ser a instância com maior número de UG, arestas e vértices, seguindo-se a instância *clas7*, em que se verifica uma situação semelhante.

De seguida, é apresentada a tabela 5, que se refere às instâncias  $Fa_{1_j}$  ( $a = 10, 28A, 28B, 44$  e  $j = 1, 2, 3, 4$ ), para os modelos sequencial e integrado. Os indicadores representados na tabela permitem uma análise sobre os resultados obtidos e permitem estabelecer uma comparação entre as duas abordagens, sequencial e integrada, tendo em consideração os diferentes conjuntos de dados e suas características. Nestas instâncias teste, o peso dos custos relativos ao NPV sofre variações de forma a ser possível compreender de que forma é que a relação dos custos e do NPV irá afetar o desempenho dos algoritmos. Para esta análise foram usados os resultados obtidos para as instâncias  $FX_{i_j}$  para o parâmetro  $i = 1, 2$  ou  $4$ .

Para as instâncias teste, foi utilizada a estimativa para o desvio “ponto médio” uma vez que os indicadores  $gap$  das instâncias têm variações substanciais.

Tabela 5 – Instâncias teste: valor total, tempo e gap

Instâncias teste	Modelo Sequencial			Modelo Integrado		
	valor total (€)	Tempo (s)	Gap (%)	valor total (€)	Tempo (s)	Gap (%)
F10_1_1	161077,53	0	0,00%	161130,77	1	0,10%
F10_1_2	160244,70	0	0,00%	160460,28	1	0,09%
F10_1_3	163816,74	0	0,00%	163906,28	1	0,00%
F10_1_4	159388,53	0	0,00%	159849,93	1	0,01%
F28A_1_1	327212,60	72	0,00%	328263,36	3601	2,10%
F28A_1_2	329892,02	96	0,00%	331021,39	1323	0,03%
F28A_1_3	327591,08	35	0,00%	327791,55	3607	1,87%
F28A_1_4	328246,06	60	0,00%	328627,65	3600	1,27%
F28B_1_1	335513,24	1776	0,00%	333758,09	3602	3,04%
F28B_1_2	342899,22	3582	0,06%	342596,64	3600	3,02%
F28B_1_3	339715,80	3600	0,00%	336125,17	3600	3,77%
F28B_1_4	342441,43	797	0,00%	343228,05	3600	2,42%
F44_1_1	589011,49	3603	1,94%	590353,52	3601	3,15%
F44_1_2	597580,70	3602	1,99%	599900,78	3601	2,96%
F44_1_3	594527,52	3605	1,73%	594616,31	3602	3,05%
F44_1_4	585488,42	3607	2,41%	588783,57	3605	3,12%
MÉDIA	352221,69	1527	0,51%	355650,83	2559	1,88%

Com base nos gaps e tempos, bem como no número de instâncias resolvidas (i.e.  $gap \leq 0,1\%$ ), o modelo sequencial é mais rápido e tem *gaps* menores que o modelo integrado, tal como se verificou nas instâncias reais.

Por outro lado, o modelo integrado obtém melhores soluções, ficando o valor médio das soluções obtidas pelo modelo sequencial a cerca de 0,96% da média dos valores das soluções obtidas para o modelo integrado.

As instâncias  $F10\_1\_j$  são compostas por pequenos conjuntos de dados. Por isso, o tempo de processamento foi sempre reduzido ou nulo, em ambas as abordagens. No modelo sequencial, as soluções obtidas correspondem à solução ótima, uma vez que os valores do *gap* são sempre 0%. Nestes casos, pode afirmar-se que  $VS = WS$ , i. e., a solução obtida corresponde à solução ótima para o modelo considerado. No modelo integrado, a solução obtida apenas apresenta um *gap* de 0,1%, o que significa que o majorante é muito pequeno e que a solução obtida está muito próxima da solução ótima. Como esperado, o valor total do modelo sequencial é inferior ao valor total do modelo integrado.

Quando o valor do *gap* é muito grande, significa que o majorante está muito distante da solução ótima, sendo espectável que, se fosse dado mais tempo de processamento, os valores da solução apresentassem diferenças significativas. Como mencionado no capítulo 4., o *gap* é o quociente da diferença do majorante e o valor da melhor solução admissível pelo valor da melhor solução admissível para cada um dos modelos:  $GapI = \frac{MI-WI}{WI}$  e  $GapS = \frac{MS-WS}{WS}$ .

Os conjuntos de dados relativo às instâncias F28A, F28B e F44 são progressivamente mais complexos, pelo que o valor do *gap* tem tendência para aumentar, principalmente no modelo integrado, uma vez que o tempo limite para o processamento não é suficiente para chegar à solução ótima.

Nas instâncias  $F28A\_1\_j$  e  $F28B\_1\_j$ , pela abordagem sequencial, os tempos de execução são reduzidos, e o *gap* é quase sempre igual a 0%, pelo que  $VS = WS$ . Para o modelo integrado, que é mais complexo, o tempo limite de execução torna-se insuficiente e o *gap* varia entre 0,03% e 3,77%. Apesar do valor total ser ligeiramente superior no modelo integrado, o tempo de execução é bastante superior, pelo que poderá não compensar a utilização do modelo integrado. Para as instâncias  $F28B\_1\_j$ , ao comparar os valores totais de ambos os modelos para estas instâncias, verifica-se que estes são geralmente maiores no modelo sequencial, pelo que seria necessário mais tempo de execução para que os valores do *gap* diminuíssem e, conseqüentemente, os valores totais aumentassem. Pelo elevado tempo de execução que seria necessário para obter uma boa solução, torna-se improvável a utilização do modelo integrado para estas instâncias, sendo compensatório o recurso ao modelo sequencial.

De forma a ter uma visão mais geral das instâncias  $Fa\_1\_*$ , foram calculadas as médias do tempo, *gap* para ambos os modelos, presentes na tabela 6. Importa referir que o símbolo asterisco representa a média, sendo que  $F\_10\_1\_*$  representa a média das instâncias  $F\_10\_1\_1, F\_10\_1\_2, F\_10\_1\_3, F\_10\_1\_4$ .

Tabela 6 – Instâncias teste: Média do tempo e *gap* para  $F10\_1$ ,  $F28A\_1$ ,  $F28B\_1$  e  $F44\_1$

Instâncias teste	Modelo Sequencial		Modelo Integrado	
	Tempo (s)	gap (%)	Tempo (s)	gap (%)
$F10\_1\_*$	0	0,00%	1	0,05%
$F28A\_1\_*$	66	0,00%	3033	1,32%

F28B_1_*	2439	0,02%	3601	3,06%
F44_1_*	3604	2,02%	3602	3,07%
MÉDIAS	1527	0,51%	2559	1,88%

A dimensão da amostra condiciona o tempo necessário para chegar a uma boa solução, sendo que o modelo integrado requer, geralmente, mais tempo de processamento que o modelo sequencial.

A tabela 6 mostra que, para o mesmo conjunto de dados, o *gap* é geralmente maior na abordagem integrada e quando comparamos os valores totais de ambas as abordagens, por vezes o valor total de uma abordagem sequencial com um *gap* baixo é maior que o valor total da abordagem integrada com um *gap* mais elevado.

Na abordagem sequencial, o tempo de processamento é geralmente suficiente para chegar a uma boa solução, pois  $gap \leq 0,1\%$ . O conjunto de instâncias *F44\_1\_\** é a exceção, uma vez que estas instâncias são mais complexas e, por isso, 3600 segundos não chegam para obter uma solução ótima ou uma solução admissível de confiança, uma vez que se verifica um *gap* elevado.

Para completar a análise, ainda foi realizado um teste em que se aumentou o tempo de processamento para um limite de 24000 segundos nas instâncias representadas, com o objetivo de compreender a importância do fator tempo na resolução dos problemas, isto é, de que forma o aumento do intervalo temporal pode melhorar os valores obtidos e se essa alteração é significativa e compensatória. Esta reflexão será baseada no decréscimo do *gap* e no aumento do valor total obtido.

A tabela 7 apresenta as três instâncias que foram sujeitas a este teste, tanto para a abordagem sequencial como para a abordagem completa. Na abordagem sequencial, as instâncias *F28A\_1\_1* e *F28B\_1\_1*, para o limite de 3600 segundos já foi possível obter a solução ótima do problema (uma vez que  $gap = 0\%$ ), em apenas 72 e 1776 segundos, respetivamente. Isto significa que um aumento no tempo máximo não vai produzir alterações nos resultados.

Tabela 7 – Instâncias teste: Valor total, tempo e *gap* para *F28A\_1*, *F28B\_1\_1* e *F44\_1\_1*

Instâncias teste	Tempo Máximo	Modelo Sequencial			Modelo Integrado		
		valor total (€)	Tempo (s)	gap (%)	valor total (€)	Tempo (s)	gap (%)
F28A_1_1	3600	327212,60	72	0,00%	328263,36	3601	2,10%
	24000				328467,58	8141	0,09%
F28B_1_1	3600	335513,24	1776	0,00%	333758,09	3602	3,04%
	24000				334081,79	24000	2,38%
F44_1_1	3600	589011,49	3601	1,94%	590353,50	3601	3,15%
	24000	590822,14	24000	1,50%	591923,43	24000	2,72%

Quanto ao tempo limite de processamento do problema (3600 segundos), é possível aferir que este é, por vezes, insuficiente para resolver as instâncias ( $gap \leq 0,1$ ).

Ao analisar a tabela 7, verifica-se que na instância *F28A\_1\_1*, pela abordagem sequencial, o *gap* é de 0%, pelo que  $VS = WS$ . Analisando a mesma instância para o modelo integrado,

verifica-se que a solução da função objetivo aumentou, com *gap* de 2,10%, que mede a diferença relativa entre o valor da solução e o valor do majorante.

Quando o limite do tempo de processamento aumentou para 24000 segundos, o valor da solução não melhorou significativamente, mas o *gap* alterou-se para 0,09%, o que significa que o majorante (que o método *branch and bound* utiliza) diminuiu, isto é, o que melhorou foi o valor do majorante. Em termos práticos, tem-se mais confiança na solução obtida, uma vez que o majorante para o valor ótimo é muito mais pequeno, sendo que o *gap* diminuiu significativamente.

Para a instância *F28B\_1\_1*, no modelo sequencial, verifica-se também que a solução obtida corresponde à solução ótima do problema. Já na abordagem integrada, o valor total é inferior, com um *gap* de 3,04%. Quando o tempo limite de processamento é alterado para 24 000 segundos, os indicadores do modelo integrado modificam-se, verificando-se um ligeiro aumento no valor total e um decréscimo significativo no *gap*. No entanto, a instância não foi resolvida, pois  $gap > 0,1$ .

Assim, apesar do aumento significativo do tempo máximo de processamento, o valor total não sofreu alterações significativas e continuam a verificar-se valores elevados para *gap* na abordagem integrada nas duas últimas instâncias, pelo que o aumento do tempo não foi suficiente para resolver a instância.

Nas tabelas 8 e 9, está representado a estimativa para o desvio real por aproximação e por PM (ponto médio) de cada instância, para as instâncias teste *Fa\_1\_j* e para as instâncias reais, respetivamente. Esta tabela permite visualizar os indicadores valor total, para o modelo integrado e modelo sequencial.

Tabela 8 - Instâncias teste: valor total e estimativa do desvio por aproximação e por ponto médio

Instâncias teste	Valor Total		Estimativa do desvio aproximação	Intervalo do desvio		Estimativa do desvio PM	
	Modelo Sequencial	Modelo Integrado					
F10_1_1	161077,53	161130,77	0,033%	0,033%	∇ intervalo do desvio ∇	0,133%	0,083%
F10_1_2	160244,70	160460,28	0,134%	0,134%		0,224%	0,179%
F10_1_3	163816,74	163906,28	0,055%	0,055%		0,055%	0,055%
F10_1_4	159388,53	159849,93	0,289%	0,289%		0,299%	0,294%
F28A_1_1	327212,60	328263,36	0,320%	0,320%		2,413%	1,367%
F28A_1_2	329892,02	331021,39	0,341%	0,341%		0,371%	0,356%
F28A_1_3	327591,08	327791,55	0,061%	0,061%		1,930%	0,996%
F28A_1_4	328246,06	328627,65	0,116%	0,061%		1,330%	0,695%
F28B_1_1	335513,24	333758,09	-0,526%	-0,526%		2,530%	1,002%
F28B_1_2	342899,22	342596,64	-0,088%	-0,148%		2,934%	1,393%
F28B_1_3	339715,80	336125,17	-1,068%	-1,068%		2,742%	0,837%
F28B_1_4	342441,43	343228,05	0,229%	0,229%		2,644%	1,436%
F44_1_1	589011,49	590353,52	0,227%	-1,708%		3,370%	0,831%
F44_1_2	597580,70	599900,78	0,387%	-1,596%		3,335%	0,870%
F44_1_3	594527,52	594616,31	0,015%	-1,715%		3,065%	0,675%
F44_1_4	585488,42	588783,57	0,560%	-1,837%		3,662%	0,913%
MÉDIA	355290,44	355650,83	0,068%	-0,442%	1,940%	0,749%	

Tabela 9 - Instâncias reais: valor total, desvio por aproximação e estimativa do desvio por ponto médio

Instâncias reais	Valor total		Desvio aproximado	Intervalo do desvio		Estimativa do desvio PM	
	Modelo Sequencial	Modelo Integrado					
clas1	3267791,39	3273022,99	0,160%	0,160%	∨ desvio real estimado ∨	0,250%	0,205%
clas4	85757,51	85735,77	-0,025%	-0,025%		0,015%	-0,005%
clas5	38018,01	38018,01	0,000%	0,000%		0,010%	0,005%
clas6	221204,11	221526,72	0,146%	0,146%		0,146%	0,146%
clas7	1763239,89	1769349,42	0,345%	0,345%		0,435%	0,390%
clas8	362786,36	362749,61	-0,010%	-0,010%		0,020%	0,005%
clas9	321084,27	322310,78	0,381%	0,381%		0,460%	0,420%
clas10	153702,94	153702,94	0,000%	0,000%		0,080%	0,040%
MÉDIA	776698,06	778302,03	0,124%	0,124%		0,177%	0,151%

Ao analisar a instância *F28B\_1\_1*, *F28B\_1\_2* e *F28B\_1\_3*, o desvio do valor total indica que existe uma perda do valor total por utilizar uma abordagem integrada. Esta situação justifica-se com o facto de o *gap* do modelo integrado ser muito superior ao *gap* do modelo sequencial.

Assim, a abordagem integrada também é preferível para estas instâncias, pois verifica-se uma perda média de 0,584% em termos de valor da função objetivo por usar a abordagem sequencial em vez da abordagem integrada.

À semelhança das instâncias teste, também as instâncias reais verificam esta situação, à exceção da *clas4* e *clas8*, que apresentam uma perda de 0,025% e 0,01%, respetivamente, por usar a abordagem integrada em vez da abordagem sequencial. Isto pode dever-se ao facto de os custos operacionais no modelo integrado serem superiores, sendo que o NPV é igual em ambos os modelos, como se pode observar na tabela 10.

No que diz respeito às restantes instâncias, o valor total na abordagem integrada é sempre maior que o valor total na abordagem sequencial. Em média, verifica-se um ganho na ordem dos 0,124% por usar a abordagem integrada em vez da abordagem sequencial.

Os desvios calculados para o valor total, NPV e custos operacionais, bem como os seus respetivos significados no âmbito do estudo do problema são contemplados para a compreensão do problema em estudo. Pretende-se também determinar os intervalos para os desvios do valor total, NVP e custos totais. Estes desvios permitem uma leitura mais rápida das relações de comparação entre os modelos sequencial e integrado.

As tabelas 10 e 11 consideram os desvios destes parâmetros para as instâncias reais e para as instâncias teste *Fa\_1\_j*, respetivamente.

Tabela 10 - Instâncias reais: desvio aproximado do valor total, desvio do NPV e desvio dos custos operacionais

<b>Instâncias reais</b>	<b>Desvio aproximado (E): Valor Total</b>	<b>Desvio: NPV</b>	<b>Desvio: Custos operacionais</b>
clas1	0,16%	-0,17%	-2,98%
clas4	-0,03%	0,00%	0,63%
clas5	0,00%	0,00%	0,00%
clas6	0,15%	-0,15%	-2,98%
clas7	0,35%	-0,83%	-8,38%
clas8	-0,01%	0,00%	0,24%
clas9	0,38%	-0,9%	-10,0%
clas10	0,00%	0,00%	0,00%
<b>MÉDIAS</b>	<b>0,12%</b>	<b>-0,25%</b>	<b>-2,94%</b>

Tabela 11 – Instâncias teste: desvio aproximado do valor total, desvio do NPV e desvio dos custos operacionais

<b>Instâncias teste</b>	<b>Desvio aproximado (E): Valor Total</b>	<b>Desvio: NPV</b>	<b>Desvio: Custos operacionais</b>
F10_1_1	0,033%	-0,1760%	-0,956%
F10_1_2	0,134%	-0,816%	-4,401%
F10_1_3	0,055%	-0,005%	-0,245%
F10_1_4	0,289%	-0,196%	-1,956%
F28A_1_1	0,320%	-0,7421%	-3,6969%
F28A_1_2	0,341%	-0,1814%	-1,6539%
F28A_1_3	0,061%	-0,6026%	-2,4282%
F28A_1_4	0,061%	-0,6026%	-2,4282%
F28B_1_1	-0,526%	-0,0004%	1,487%
F28B_1_2	-0,088%	-0,112%	-0,181%
F28B_1_3	-1,068%	-0,057%	2,679%
F28B_1_4	0,229%	-0,239%	-1,645%
F44_1_1	0,227%	-0,188%	-1,426%
F44_1_2	0,387%	-0,174%	-1,898%
F44_1_3	0,015%	-0,532%	-2,206%
F44_1_4	0,560%	-0,121%	-2,135%
<b>MÉDIAS</b>	<b>0,064%</b>	<b>-0,296%</b>	<b>-1,443%</b>

Para as instâncias teste, o desvio do NPV verifica-se sempre negativo, o que significa que o modelo sequencial verifica um ganho percentual quando comparado ao modelo integrado. Também a estimativa do desvio por aproximação relativa aos custos operacionais se verifica quase sempre negativo.

Nas instâncias reais, o desvio do NPV também é sempre negativo ou nulo pelo que o modelo sequencial, também nestas instâncias, verifica por vezes um ganho percentual quando comparado ao modelo integrado.

Relativamente às instâncias teste, para a instância  $F10\_1\_1$ , quando é comparado o valor total do modelo sequencial com o valor total do modelo integrado, é possível verificar que se perde 0,033% por considerar uma abordagem mais simples. Relativamente ao NPV, verifica-se uma ligeira diferença entre os modelos, sendo que o modelo sequencial apresenta um valor superior, como seria de esperar. O valor do NPV é compensado com o valor total dos custos operacionais. O modelo sequencial apresenta sempre um NPV maior ou igual que o modelo integrado uma vez que no modelo sequencial o NPV é calculado independentemente do transporte, pretendo obter-se o valor máximo. No modelo integrado, pretende-se obter a solução que tem o benefício global máximo ( $valor\ total = NPV - custos\ totais$ ).

Por isto, é normal que o desvio relativo ao NPV seja negativo, pois o modelo sequencial verifica um ganho percentual quando comparado ao modelo integrado. Também o desvio relativo aos custos operacionais se antecipa negativo, uma vez que o modelo sequencial apresenta maiores valores no indicador dos custos operacionais. Isto leva a que o desvio do valor total seja positivo, isto é, existe uma perda percentual por utilizar o modelo sequencial em detrimento do modelo integrado.

À exceção das instâncias  $F28B\_1\_1$ ,  $F28B\_1\_2$  e  $F28B\_1\_3$ , todas as outras apresentam uma relação semelhante na análise nos parâmetros E dos indicadores valor total, NPV e custos operacionais. Nestas três instâncias, é possível verificar que existe sempre uma perda de valor total quando se faz uma abordagem integrada em vez de uma abordagem sequencial. No que se refere ao desvio do NPV, este é sempre negativo, o que significava que existe um ganho em utilizar uma abordagem sequencial em detrimento de uma abordagem integrada, como seria de esperar.

De seguida, observa-se a tabela 12, em que estão representados os intervalos do desvio para cada um dos conjuntos de instâncias  $Fa\_1\_j$ , para os indicadores valor total, NPV e custos operacionais.

Os testes que se seguem na tabela 12 permitem tirar importantes conclusões sobre a influência do parâmetro  $i$  nos resultados obtidos no NPV.

Em seguida serão realizados testes para perceber de que forma a relação entre os valores NPV e os custos podem afetar o desempenho. Para isso consideram-se as instâncias onde o parâmetro  $i$  represente diferentes pesos do NPV no problema.

Para simplificar a apresentação dos restantes dados e facilitar a leitura dos resultados e os cálculos consequentes, foram calculadas as médias dos indicadores tempo, gap e valor total, para as instâncias  $F10\_1\_j$ ,  $F10\_2\_j$  e  $F10\_4\_j$  ( $j = 1, 2, 3, 4$ ), tendo sido obtidos os seguintes valores para as abordagens sequencial e integrada, apresentadas na tabela 12.

Tabela 12 - Instâncias teste: Médias dos indicadores tempo, gap e estimativa do desvio do valor total por aproximação para as instâncias  $Fa_{1\_}$ ,  $Fa_{2\_}$ ,  $Fa_{4\_}$

Instâncias teste	Modelo Sequencial		Modelo Integrado		Estimativa do desvio por aproximação
	Tempo (s)	Gap (%)	Tempo (s)	gap (%)	
F10_1_*	0,0	0,05%	1,0	0,05%	0,128%
F10_2_*	0,0	0,00%	1,0	0,01%	0,037%
F10_4_*	0,0	0,00%	0,5	0,05%	0,014%
F28A_1_*	66	0,00%	3033	1,32%	0,196%
F28A_2_*	44	0,07%	1798	0,16%	0,023%
F28A_4_*	64	0,08%	873	0,09%	0,009%
F28B_1_*	2439	0,02%	3601	3,06%	-0,363%
F28B_2_*	2185	0,08%	3601	1,22%	-0,138%
F28B_4_*	2875	0,13%	3600	0,55%	-0,043%
F44_1_*	3604	2,02%	3602	3,07%	0,297%
F44_2_*	4271	0,84%	3602	1,19%	0,085%
F44_4_*	3602	0,39%	3601	0,52%	0,024%

Quando comparamos os resultados obtidos nas instâncias  $F10_{1_j}$  com os dados obtidos nas instâncias  $F10_{2_j}$  e  $F10_{4_j}$ , as diferenças verificadas nos parâmetros obtidos no *gap* e no tempo de processamento não são significativas, uma vez que nas 12 instâncias, o *gap* varia entre 0% e 0,1% e o tempo de processamento varia entre 0 e 1, para ambos os modelos (verificar anexo 2).

No modelo sequencial, as médias do *gap* diminuem à medida que se avança no valor de  $i$ , variando entre 0% e 0,13% nas instâncias  $F10_{i\_}$ ,  $F28A_{i\_}$  e  $F28B_{i\_}$ . Nas instâncias  $F44_{i\_}$ , o valor do *gap* aumenta significativamente, variando entre 0,39% e 2,02%, o que significa que o majorante para o valor ótimo é muito grande e, por isso, não se tem muita confiança no valor da função objetivo. Quando o *gap* é zero ou quase, o tempo de execução diminui, ou seja, os problemas ficam mais fáceis de resolver, em ambas as abordagens.

Nas instâncias  $F28A_{1_j}$ , no modelo sequencial, as médias do tempo de processamento variam entre 44 e 66 segundos e o *gap* varia entre 0% e 0,08%; no modelo integrado, as médias do tempo de processamento variam entre 873 e 3033 e o *gap* varia entre 0% e 0,16%.

O desvio real é o desvio relativo da abordagem sequencial relativamente à abordagem integrada, isto é, aquilo que se perde por usar a abordagem sequencial em vez da integrada. Verifica-se que a perda é progressivamente menor à medida que o  $i$  aumenta. Para todas as instâncias, a estimativa do desvio real deve ser sempre positiva.

Através da análise das última três linhas da tabela 12, é possível verificar rapidamente um decréscimo nos valores do *gap*, nos desvios e nos intervalos dos desvios à medida que o valor de  $i$  aumenta. Esta descida também se verifica, naturalmente, na estimativa do desvio (ponto médio). Isto deve-se ao facto de o parâmetro  $i$  indicar o peso do NPV. Quando o NPV é muito grande comparado com os custos operacionais os problemas serão mais fáceis de resolver e, por isso, apresentam com um *gap* menor e são resolvidos em menos tempo (o que se verificaria se não houvesse limite no tempo de processamento). Esta afirmação é válida tanto para a abordagem sequencial como para a abordagem integrada. Nesta situação, os valores obtidos pela estimativa do desvio por PM ajudam a interpretar melhor os resultados (ver tabela 12).

## 5. CONCLUSÃO

Neste estudo, foram abordados processos que decorrem ao nível do planeamento operacional da gestão florestal, como a escolha das áreas de extração de madeira; localização das áreas de carregamento da madeira e construção e manutenção de estradas para assegurar o abastecimento de madeira ao longo do horizonte temporal de planeamento. O processo que decorre desde a seleção de árvores a cortar até ao transporte de madeira para o exterior da floresta é complexo e envolve a tomada de decisões.

Para que fosse possível a realização deste trabalho, foram disponibilizados conjuntos de dados da floresta no âmbito do Projeto *BioEcosys*, nomeadamente, instâncias teste com parâmetros baseados na instância do caso de estudo e oito instâncias correspondentes a diferentes porções da floresta descrita no caso em estudo. Para a análise destes dados, foram estruturados dois modelos – modelo sequencial e modelo integrado. O modelo integrado considera as decisões sobre prescrições e remoção da madeira e o modelo sequencial toma duas decisões de forma separada – primeiro decide sobre as melhores prescrições para maximizar o valor atual líquido, e depois considera as decisões sobre a construção e manutenção de estradas, carregamento e transporte de madeira.

Com este trabalho pretende-se compreender qual a abordagem mais adequada para a resolução das instâncias em estudo, se o modelo integrado ou se o modelo sequencial – de acordo com os valores obtidos.

Para tornar possível a comparação entre estes dois modelos, foi utilizado um solver de programação linear inteira mista (FICO® Xpress Optimization), tendo sido utilizados os indicadores: qualidade das soluções obtidas em termos de valor da função objetivo e o tempo computacional necessário para obter as soluções.

Os modelos matemáticos propostos, em programação linear inteira mista, mostraram ser capazes de dar respostas ao problema em questão, sendo possível determinar quais as prescrições utilizadas para cada UG, bem como as estradas a serem construídas e/ou mantidas num determinado período e informações sobre o transporte e carregamento da madeira, sempre com os respetivos custos e benefícios associados.

O valor ótimo do modelo integrado é sempre melhor ou igual ao valor ótimo do modelo sequencial, uma vez que as decisões são tomadas com o objetivo de obter o maior benefício global possível, enquanto que o modelo sequencial é condicionado pela decisão sobre as prescrições que visa a obtenção do maior NPV possível, sendo depois tomadas as decisões sobre o transporte e carregamento de madeira e construção de estradas, que têm custos elevados associados.

A partir da exploração das várias instâncias, em ambas as abordagens, é possível concluir que o tempo de processamento é tanto maior quanto maior for a dimensão dos dados. Ainda nesta linha de pensamento, verifica-se que a abordagem integrada necessita de um maior tempo de processamento do que a abordagem sequencial, como já foi referido, se o objetivo for tentar chegar à melhor solução possível.

O valor total obtido com o modelo integrado é, em geral, superior aos do modelo sequencial, mas com o modelo sequencial, as soluções são obtidas de forma mais rápida. Por vezes, verifica-se que o modelo sequencial resulta em valores mais elevados para a função objetivo (valor total) quando comparado ao modelo integrado, para o mesmo intervalo de tempo,

uma vez que os valores do *gap* para o modelo integrado são, geralmente, bastante elevados quando comparados com os valores do *gap* do modelo sequencial. Estes *gaps* levam a considerar que seria necessário mais tempo para chegar a uma solução admissível.

Através da análise dos resultados, é possível verificar que existe um decréscimo nos valores do *gap*, nos valores dos desvios e nos intervalos dos desvios à medida que o valor do peso do NPV aumenta. Esta descida também se verifica, naturalmente, na estimativa do desvio real (ponto médio). Quando o NPV é muito grande comparado com os custos operacionais os problemas serão mais fáceis de resolver e, por isso, apresentam com um *gap* menor e são resolvidos em menos tempo (o que se verificaria se não houvesse limite no tempo de processamento). Esta afirmação é válida tanto para a abordagem sequencial como para a abordagem integrada.

Tendo em conta a análise dos resultados obtidos para ambas as abordagens, foi possível verificar que com o modelo sequencial é possível, por vezes, chegar à solução ótima (*gap* = 0%). O modelo integrado acaba por ser mais demorado, de uma forma geral, sendo que o tempo computacional definido não é, geralmente, suficiente para chegar a uma solução ótima, obtendo-se *gaps* elevados, especialmente quando se trata de um conjunto de dados mais extenso. Assim, para estes conjuntos de dados mais extensos, verifica-se que a abordagem sequencial torna-se mais adequada, uma vez que é mais rápida e a perda de valor objetivo face à abordagem integrada não é significativa.

Este estudo visa contribuir para a discussão da dinâmica da gestão florestal ao nível do planeamento operacional, em particular no que se refere às decisões sobre corte, colheita e transporte de madeira, bem como a construção e/ou manutenção de estradas. Este é um tema em aberto com muitas linhas em investigação, pelo que este trabalho não pretende ser um fim, mas sim um contributo para estudos que possam revelar mais sobre o planeamento e tomada de decisões no âmbito da gestão florestal, tendo sempre em consideração as questões ambientais e de sustentabilidade.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andalajt, N. et al. (2003) A problem of forest harvesting and road building solved through model strengthening and Lagrangean relaxation, *Operations Research*, 51(4), pp. 613–628.
- Botequim, B. et al. (2017) 'Modeling post-fire mortality in pure and mixed forest stands in Portugal-A forest planning-oriented model', *Sustainability* (Switzerland), 9(3).
- Briggs, D.G. (1980) A dynamic programming approach to optimizing stem conversion. *Ph.D. Thesis*, University of Washington.
- Botequim, Brigitte, Manuel Arias-Rodil, Jordi Garcia-Gonzalo, Andreia Silva, Susete Marques, José G. Borges, Maria Manuela Oliveira, and Margarida Tomé. 2017. "Modeling Post-Fire Mortality in Pure and Mixed Forest Stands in Portugal-A Forest Planning-Oriented Model." *Sustainability* (Switzerland) 9 (3). <https://doi.org/10.3390/su9030390>.
- Church R.L. (2007) Tactical-Level Forest Management Models. In: Weintraub A., Romero C., Bjørndal T., Epstein R., Miranda J. (eds) *Handbook Of Operations Research In Natural Resources*. International Series In Operations Research amp; Mana, vol 99. Springer, Boston, MA
- Clark, M., Meller, D., & McDonald, P. (2000). A three-stage heuristic for harvest scheduling with access road network development. *Forest Science*, 46(2), 204–218
- Derhy, M.-F. (2010) Integer Programming: The Branch and Bound Method, Linear Programming, Sensitivity Analysis & Related Topics, p. 464. Available at: <http://www.pearsoned.co.uk/bookshop/detail.asp?item=100000000289101>.
- Epstein, R. et al. (2001) PLANEX: A system to identify landing locations and access, *Proc. of the International Mountain Logging and 11th Pacific Northwest Skyline Symposium*, pp. 190–193.
- Epstein, R. et al. (2006) A combinatorial heuristic approach for solving real-size machinery location and road design problems in forestry planning, *Operations Research*, 54(6), pp. 1017–1027.
- Epstein, R. et al. (2016) Harvest operational models in forestry, *International Series in Operations Research and Management Science*, 99, pp. 365–377.
- Epstein, Rafael, Andrés Weintraub, Pedro Sapunar, Enrique Nieto, Julian B. Sessions, John Sessions, Fernando Bustamante, and Hugo Musante. 2006. "A Combinatorial Heuristic Approach for Solving Real-Size Machinery Location and Road Design Problems in Forestry Planning." *Operations Research* 54 (6): 1017–27. <https://doi.org/10.1287/opre.1060.0331>.
- Epstein, Rafael, Andrés Weintraub, John Sessions, Bren Sessions, Pedro Sapunar, Enrique Nieto, Fernando Bustamante, and Hugo Musante. 2001. "PLANEX: A System to Identify Landing Locations and Access." *Proc. of the International Mountain Logging and 11th Pacific Northwest Skyline Symposium*, 190–93.
- Eriksson, Ljusk Ola. 2020. "ALTERFOR in Nutshell," no. 676754.

- Glover, F. (1986) Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence, *Computers and Operations Research*. Vol. 13, pp. 533-549.
- Glover, F. and Martí, R. (1986) Chapter 4 TABU SEARCH, *Tabu Search*, pp. 1–16.
- Grondin, F. (1998) Improvements of the dynamic programming algorithm for tree bucking, *Wood and Fiber Science*, 30(1), pp. 91–104.
- Grondin, François. 1998. “Improvements of the Dynamic Programming Algorithm for Tree Bucking.” *Wood and Fiber Science* 30 (1): 91–104.
- Gumus, S., Acar, H. H. and Toksoy, D. (2008) Functional forest road network planning by consideration of environmental impact assessment for wood harvesting, *Environmental Monitoring and Assessment*, 142(1–3), pp. 109–116.
- Guignard, M.; Ryu, C.; Spielberg, K.(1998) Model tightening for integrated timber harvest and transportation Planning. *European Journal of Operational Research* v. 111, n. 1, p. 448-460.
- Gunn E.A. (2007) Models for Strategic Forest Management. In: Weintraub A., Romero C., Bjørndal T., Epstein R., Miranda J. (eds) *Handbook Of Operations Research In Natural Resources. International Series In Operations Research amp; Mana*, vol 99. Springer, Boston, MA
- Jones, J.G., Weintraub, A, Meacham, M.L and Magendzo, A, (1991) A heuristic process for solving mixed-integer land management and transportation models. USDA Forest Service, *Intermountain Research Station*, Ogden, UT.
- Henningsson, M., Karlsson, J. and Rönnqvist, M. (2007) Optimization models for forest road upgrade planning, *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, 6(1), pp. 3–23.
- Karlsson, J., Rönnqvist, M. and Frisk, M. (2006) RoadOpt: A decision support system for road upgrading in forestry, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 21(SUPPL. 7), pp. 5–15.
- Kochenderfer, J.N. & Helvey, J.D. (1984) Soil losses from a minimum-standard truck road constructed in the Appalachians. In: *Mountain Logging Symposium*. (Ed. by P. Peters and J. Luchok). pp. 215-275.
- Legües, A.D., Ferland, J.A., Ribeiro, C.C., Vera, J.R., Weintraub, A., 2007: A tabu search approach for solving a difficult forest harvesting machine location problem. *European Journal of Operational Research* 179(3): 788–805.
- Marchi, Enrico, Woodam Chung, Rien Visser, Dalia Abbas, Tomas Nordfjell, Piotr S. Mederski, Andrew McEwan, Michal Brink, and Andrea Laschi. 2018. “Sustainable Forest Operations (SFO): A New Paradigm in a Changing World and Climate.” *Science of the Total Environment* 634: 1385–97. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.084>.
- Marshall, Hamish D., Glen Murphy, and Kevin Boston. 2006. “Three Mathematical Models for Bucking-to-Order.” *Silva Fennica* 40 (1): 127–42. <https://doi.org/10.14214/sf.356>.
- Lofroth, C., Adolfsson, J., Persson, B., Persson, T. & Bergstrom, J. (2000). Handledning av NVDB\*/Registrering av skogsbilvagar [Guide for NRDB/Registration of forest roads.]

Uppsala: Forest Research Institute of Sweden.

Marchi, E. et al. (2018) Sustainable Forest Operations (SFO): A new paradigm in a changing world and climate, *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 634, pp. 1385–1397.

Marshall, H. D., Murphy, G. and Boston, K. (2006) Three mathematical models for bucking-to-order, *Silva Fennica*, 40(1), pp. 127–142.

Pnevmaticos, S. M., and S. H. Mann. (1972) Dynamic programming in tree bucking. *Forest Prod. J.* 22(2):2–32.

Schiess, P. and Krogstad, F. (2007) Forest Harvest and Transportation, *Fishes and Forestry*, pp. 193–215.

T.L.Magnanti and L.A.Wolsey "Optimal trees" in Handbooks in Operations Research and Management Science Volume 7, 1995, Pages 503-615.

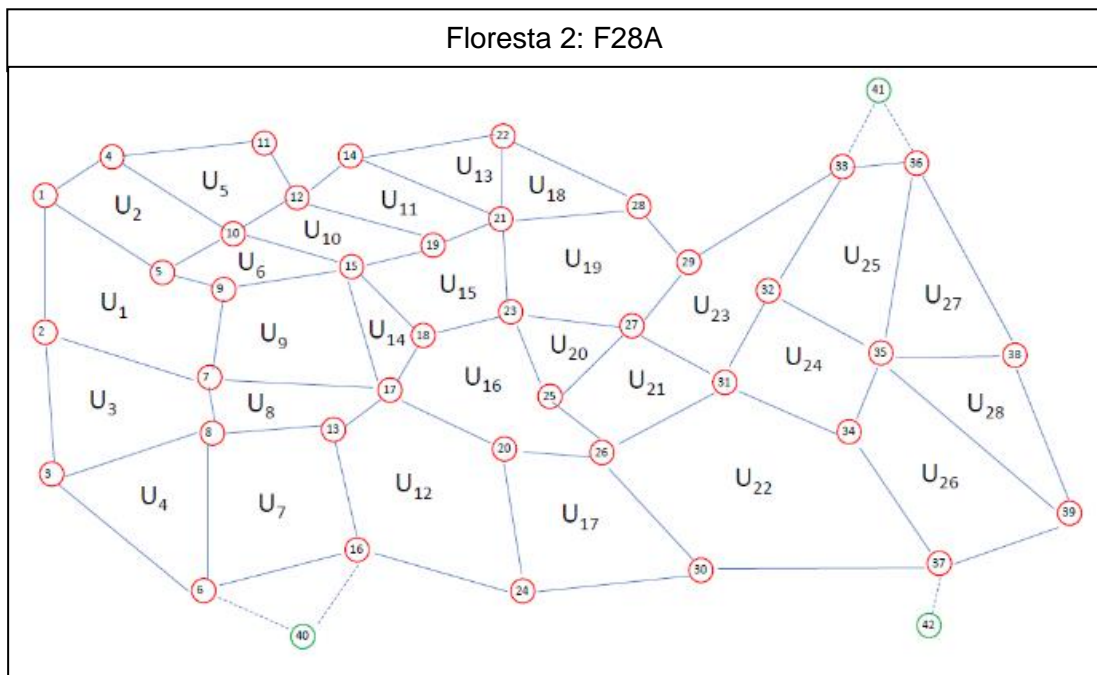
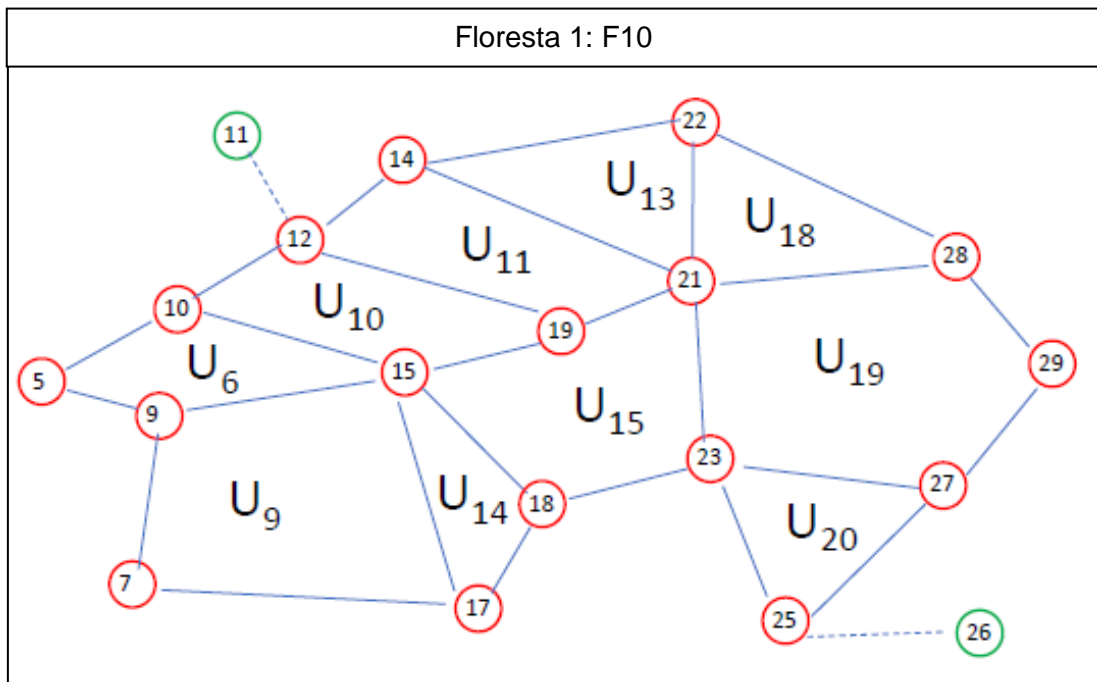
Vera, J. R. et al. (2003) A lagrangian relaxation approach for a machinery location problem in forest harvesting, *Pesquisa Operacional*, 23(1), pp. 111–128.

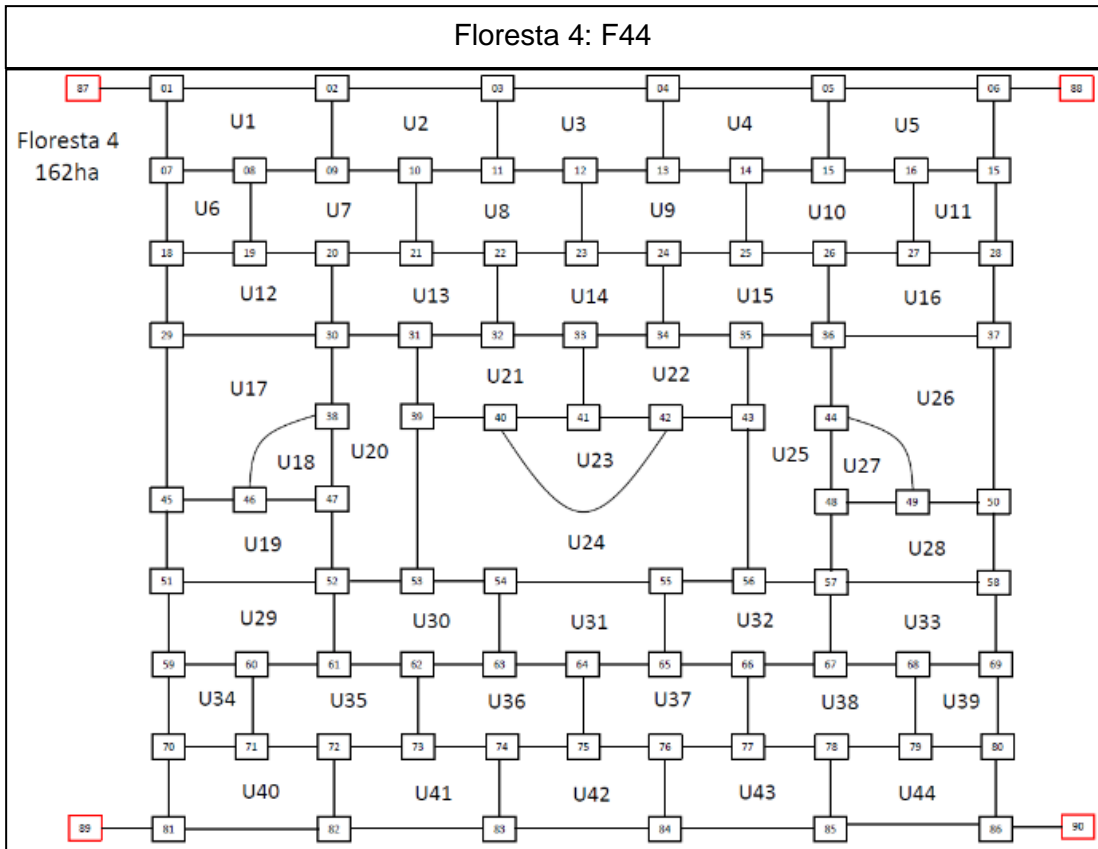
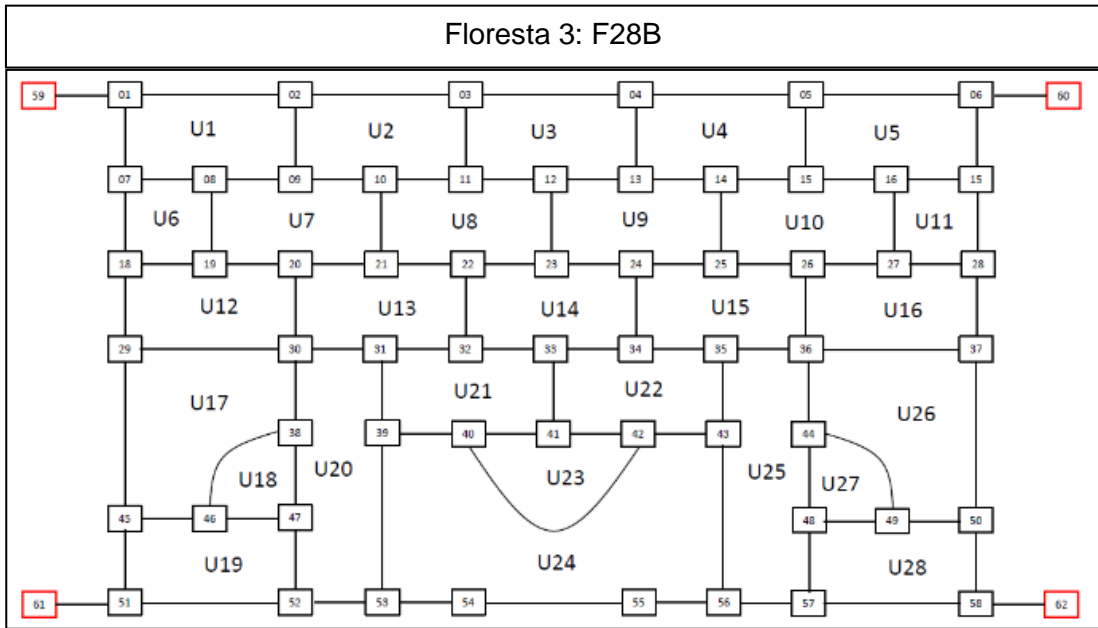
Weintraub, A., Navon, D. (1976) A forest management planning model integrating silvicultural and transportation activities. *Management Science* 22(12): 1299–1309.

Weintraub, A., Guitart, S., and Kohn, V., 1986, Strategic planning in forest industries, *European Journal of Operational Research* 24: 152-162.

## **7. ANEXOS**

**ANEXO 1. - MAPAS DAS FLORESTAS F10, F28A, F28B E F44**





## ANEXO 2. – RESULTADOS DA INSTÂNCIA *F10<sub>i,j</sub>*

Instâncias	Indicadores	Modelo Sequencial	Modelo Integrado
F10_1_1	Valor Total	161077,53	161130,77
	NPV	204694,36	204334,68
	Custos operacionais	43616,83	43203,91
	Tempo (segundos)	0	1
	Gap	0,00%	0,10%
F10_1_2	Valor Total	160244,70	160460,28
	NPV	204627,23	202971,96
	Custos operacionais	44382,53	42511,68
	Tempo (segundos)	0	1
	Gap	0,00%	0,09%
F10_1_3	Valor Total	163816,74	163906,28
	NPV	204960,59	204949,72
	Custos operacionais	41143,85	41043,44
	Tempo (segundos)	0	1
	Gap	0,00%	0,00%
F10_1_4	Valor Total	159388,53	159849,93
	NPV	204222,87	203824,00
	Custos operacionais	44834,34	43974,07
	Tempo (segundos)	0	1
	Gap	0,00%	0,01%

Parâmetro E	Instâncias				Médias
	F10_1_1	F10_1_2	F10_1_3	F10_1_4	
Valor Total	0,0330%	0,1344%	0,0546%	0,2886%	0,1277%
NPV	-0,1760%	-0,8155%	-0,0053%	-0,1957%	-0,2981%
Custos operacionais	-0,9557%	-4,4008%	-0,2446%	-1,9563%	-1,8894%

Instâncias	Q
F10_1_1	0,9997
F10_1_2	0,9987
F10_1_3	0,9995
F10_1_4	0,9971

Instância	GAP (%)	
	Sequencial	Integrado
F10_1_1	0,00%	0,10%
F10_1_2	0,00%	0,09%
F10_1_3	0,00%	0,00%
F10_1_4	0,00%	0,01%

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (Valor Total)		Ponto médio
	<desvio real estimado<		
F10_1_1	0,033%	0,133%	0,083%
F10_1_2	0,134%	0,224%	0,179%
F10_1_3	0,055%	0,055%	0,055%
F10_1_4	0,289%	0,299%	0,294%
Média	0,128%	0,178%	0,153%

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (NPV)		Ponto médio
	<desvio real estimado<		
F10_1_1	-0,176%	-0,076%	-0,126%
F10_1_2	-0,816%	-0,726%	-0,771%
F10_1_3	-0,005%	-0,005%	-0,005%
F10_1_4	-0,196%	-0,186%	-0,191%
Média	-0,298%	-0,248%	-0,273%

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (Custos operacionais)		Ponto médio
	<desvio real estimado<		
F10_1_1	-0,956%	-0,856%	-0,906%
F10_1_2	-4,401%	-4,311%	-4,356%
F10_1_3	-0,245%	-0,245%	-0,245%
F10_1_4	-1,956%	-1,946%	-1,951%
Média	-1,889%	-1,839%	-1,864%

Instâncias	Indicadores	Modelo Sequencial	Modelo Integrado
F10_2_1	Valor Total	365771,92	365771,92
	NPV	409388,75	409388,75
	Custos operacionais	43616,83	43616,83
	Tempo (segundos)	0	1
	Gap	0,00%	0,03%
F10_2_2	Valor Total	364871,83	364944,96
	NPV	409254,36	409166,93
	Custos operacionais	44382,53	44221,97
	Tempo (segundos)	0	1
	Gap	0,00%	0,01%
F10_2_3	Valor Total	368777,31	368855,98
	NPV	409921,16	409899,42
	Custos operacionais	41143,85	41043,44
	Tempo (segundos)	0	1
	Gap	0,00%	0,00%
F10_2_4	Valor Total	363611,35	363997,2
	NPV	408445,69	408430,60
	Custos operacionais	44834,34	44433,4
	Tempo (segundos)	0	1
	Gap	0,00%	0,00%

Parâmetro E	Instâncias				Médias
	F10_2_1	F10_2_2	F10_2_3	F10_2_4	
Valor Total	0,0000%	0,0200%	0,0213%	0,1060%	0,0368%
NPV	0,0000%	-0,0214%	-0,0053%	-0,0037%	-0,0076%
Custos operacionais	0,0000%	-0,3631%	-0,2446%	-0,9023%	-0,3775%

Instâncias	Q
F10_2_1	1,0000
F10_2_2	0,9998
F10_2_3	0,9998
F10_2_4	0,9989

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (Valor Total)		Ponto médio
F10_2_1	0,000%	<desvio real estimado<	0,030%
F10_2_2	0,020%		0,030%
F10_2_3	0,021%		0,021%
F10_2_4	0,106%		0,106%
Média	0,037%		0,047%

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (NPV)		Ponto médio
F10_2_1	0,000%	<desvio real estimado<	0,030%
F10_2_2	-0,021%		-0,011%
F10_2_3	-0,005%		-0,005%
F10_2_4	-0,004%		-0,004%
Média	-0,008%		0,002%

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (Custos operacionais)		Ponto médio
F10_2_1	0,000%	<desvio real estimado<	0,030%
F10_2_2	-0,363%		-0,353%
F10_2_3	-0,245%		-0,245%
F10_2_4	-0,902%		-0,902%
Média	-0,378%		-0,368%

Instância	GAP (%)	
	Sequencial	Integrado
F10_2_1	0,00%	0,03%
F10_2_2	0,00%	0,01%
F10_2_3	0,00%	0,00%
F10_2_4	0,00%	0,00%

Instâncias	Indicadores	Modelo Sequencial	Modelo Integrado
F10_4_1	Valor Total	775160,65	775160,65
	NPV	818777,48	818777,48
	Custos operacionais	43616,83	43616,83
	Tempo (segundos)	0	0
	Gap	0,00%	0,02%
F10_4_2	Valor Total	774126,26	774126,26
	NPV	818598,79	818508,79
	Custos operacionais	44382,53	44382,53
	Tempo (segundos)	0	1
	Gap	0,00%	0,00%
F10_4_3	Valor Total	778698,44	778755,4
	NPV	819842,29	819798,84
	Custos operacionais	41143,85	41043,44
	Tempo (segundos)	0	0
	Gap	0,00%	0,09%
F10_4_4	Valor Total	772057,06	772427,83
	NPV	816891,40	816861,23
	Custos operacionais	44834,34	44433,4
	Tempo (segundos)	0	1
	Gap	0,00%	0,07%

Parâmetro E	Instâncias				Médias
	F10_4_1	F10_4_2	F10_4_3	F10_4_4	
Valor Total	0,0000%	0,0000%	0,0073%	0,0480%	0,0138%
NPV	0,0000%	-0,0110%	-0,0053%	-0,0037%	-0,0050%
Custos operacionais	0,0000%	0,0000%	-0,2446%	-0,9023%	-0,2867%

Instâncias	Q
F10_4_1	1,0000
F10_4_2	1,0000
F10_4_3	0,9999
F10_4_4	0,9995

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (Valor Total)		Ponto médio
		<desvio real estimado<	
F10_2_1	0,000%	0,020%	0,010%
F10_2_2	0,000%	0,000%	0,000%
F10_2_3	0,007%	0,097%	0,052%
F10_2_4	0,048%	0,118%	0,083%
Média	0,014%	0,059%	0,036%

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (NPV)		Ponto médio
		<desvio real estimado<	
F10_2_1	0,000%	0,020%	0,010%
F10_2_2	-0,011%	-0,011%	-0,011%
F10_2_3	-0,005%	0,085%	0,040%
F10_2_4	-0,004%	-0,832%	-0,418%
Média	-0,005%	-0,185%	-0,095%

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (Custos operacionais)		Ponto médio
		<desvio real estimado<	
F10_2_1	-0,020%	0,020%	0,000%
F10_2_2	0,000%	0,000%	0,000%
F10_2_3	-0,335%	-0,155%	-0,245%
F10_2_4	-0,972%	-0,832%	-0,902%
Média	-0,332%	-0,242%	-0,287%

Instância	GAP (%)	
	Sequencial	Integrado
F10_4_1	0,00%	0,02%
F10_4_2	0,00%	0,00%
F10_4_3	0,00%	0,09%
F10_4_4	0,00%	0,07%

### ANEXO 3. – RESULTADOS DA INSTÂNCIA *F28A<sub>i,j</sub>*

Instâncias	Indicadores	Modelo Sequencial	Modelo Integrado
F28A_1_1	Valor Total	327212,60	328263,36
	NPV	449576,08	446264,43
	Custos operacionais	122363,48	118001,07
	Tempo (segundos)	72	3601
	Gap	0,00%	2,10%
F28A_1_2	Valor Total	329892,02	331021,39
	NPV	449310,54	448496,94
	Custos operacionais	119418,52	117475,55
	Tempo (segundos)	96	1323
	Gap	0,00%	0,03%
F28A_1_3	Valor Total	327591,08	327791,55
	NPV	449672,09	446978,47
	Custos operacionais	122081,01	119186,92
	Tempo (segundos)	35	3607
	Gap	0,00%	1,87%
F28A_1_4	Valor Total	328246,06	328627,65
	NPV	451379,70	447439,55
	Custos operacionais	123133,64	118811,9
	Tempo (segundos)	60	3600
	Gap	0,00%	1,27%

Parâmetro E	Instâncias				Médias
	F28A_1_1	F28A_1_2	F28A_1_3	F28A_1_4	
Valor Total	0,3201%	0,3412%	0,0612%	0,0612%	0,196%
NPV	-0,7421%	-0,1814%	-0,6026%	-0,6026%	-0,532%
Custos operacionais	-3,6969%	-1,6539%	-2,4282%	-2,4282%	-2,552%

Instâncias	Q
F28A_1_1	0,996799
F28A_1_2	0,996588
F28A_1_3	0,999388
F28A_1_4	0,998839

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (Valor Total)		Ponto médio
F28A_1_1	0,3201%	<desvio real estimado<	2,4134%
F28A_1_2	0,3412%		0,3711%
F28A_1_3	0,0612%		1,9300%
F28A_1_4	0,0612%		1,3297%
Média	0,1959%		1,5110%

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (NPV)		Ponto médio
F28A_1_1	-0,742%	<desvio real estimado<	1,351%
F28A_1_2	-0,181%		-0,152%
F28A_1_3	-0,603%		1,266%
F28A_1_4	-0,603%		0,666%
Média	-0,532%		0,783%

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (Custos operacionais)		Ponto médio
F28A_1_1	-3,697%	<desvio real estimado<	-1,604%
F28A_1_2	-1,654%		-1,624%
F28A_1_3	-2,428%		-0,559%
F28A_1_4	-2,428%		-1,160%
Média	-2,552%		-1,237%

Instância	GAP (%)	
	Sequencial	Integrado
F28A_1_1	0,00%	2,10%
F28A_1_2	0,00%	0,03%
F28A_1_3	0,00%	1,87%
F28A_1_4	0,00%	1,27%

Instâncias	Indicadores	Modelo Sequencial	Modelo Integrado
F28A_1_1	Valor Total	776788,81	776788,81
	NPV	899152,29	899152,29
	Custos operacionais	122363,48	122363,48
	Tempo (segundos)	41	1193
	Gap	0,10%	0,00%
F28A_1_2	Valor Total	779202,62	779734,14
	NPV	898621,14	897475,11
	Custos operacionais	119418,52	117740,97
	Tempo (segundos)	61	381
	Gap	0,00%	0,09%
F28A_1_3	Valor Total	777263,15	777416,78
	NPV	899344,16	899170,19
	Custos operacionais	122081,01	121753,41
	Tempo (segundos)	37	2018
	Gap	0,07%	0,09%
F28A_1_4	Valor Total	779625,69	779660,9
	NPV	902759,33	902731,70
	Custos operacionais	123133,64	123070,8
	Tempo (segundos)	38	3601
	Gap	0,10%	0,45%

Parâmetro E	Instâncias				Médias
	F28A_2_1	F28A_2_2	F28A_2_3	F28A_2_4	
Valor Total	0,0000%	0,0682%	0,0198%	0,0045%	0,023%
NPV	0,0000%	-0,1277%	-0,0193%	-0,0031%	-0,038%
Custos operacionais	0,0000%	-1,4248%	-0,2691%	-0,0511%	-0,436%

Instâncias	Q
F28A_2_1	1
F28A_2_2	0,999318
F28A_2_3	0,999802
F28A_2_4	0,999955

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (Valor Total)		Ponto médio
F28A_2_1	-0,1000%	<desvio real estimado>	0,0000%
F28A_2_2	0,0682%		0,1581%
F28A_2_3	-0,0502%		0,1097%
F28A_2_4	-0,0955%		0,4545%
Média	-0,0444%		0,1806%

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (NPV)		Ponto médio
F28A_2_1	-0,100%	<desvio real estimado>	0,000%
F28A_2_2	-0,128%		-0,038%
F28A_2_3	-0,089%		0,071%
F28A_2_4	-0,103%		0,447%
Média	-0,105%		0,120%

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (Custos operacionais)		Ponto médio
F28A_2_1	-0,100%	<desvio real estimado>	0,000%
F28A_2_2	-1,425%		-1,335%
F28A_2_3	-0,339%		-0,179%
F28A_2_4	-0,151%		0,399%
Média	-0,504%		-0,279%

Instância	GAP (%)	
	Sequencial	Integrado
F28A_2_1	0,10%	0,00%
F28A_2_2	0,00%	0,09%
F28A_2_3	0,07%	0,09%
F28A_2_4	0,10%	0,45%

Instâncias	Indicadores	Modelo Sequencial	Modelo Integrado
F28A_1_1	Valor Total	1675742,25	1675742,25
	NPV	1798304,45	1798304,45
	Custos operacionais	122562,2	122562,2
	Tempo (segundos)	70	1048
	Gap	0,08%	0,08%
F28A_1_2	Valor Total	1677823,82	1678034,63
	NPV	1797242,34	1797225,79
	Custos operacionais	119418,52	119191,16
	Tempo (segundos)	63	430
	Gap	0,09%	0,10%
F28A_1_3	Valor Total	1676273,91	1676686,9
	NPV	1798688,31	1798587,54
	Custos operacionais	122414,4	121900,64
	Tempo (segundos)	80	960
	Gap	0,06%	0,10%
F28A_1_4	Valor Total	1682385,16	1682392,75
	NPV	1805518,80	1805463,55
	Custos operacionais	123133,64	123070,8
	Tempo (segundos)	41	1052
	Gap	0,10%	0,07%

Parâmetro E	Instâncias				Médias
	F28A_4_1	F28A_4_2	F28A_4_3	F28A_4_4	
Valor Total	0,0000%	0,0126%	0,0246%	0,0005%	0,009%
NPV	0,0000%	-0,0009%	-0,0056%	-0,0031%	-0,002%
Custos operacionais	0,0000%	-0,1908%	-0,4215%	-0,0511%	-0,166%

Instâncias	Q
F28A_4_1	1
F28A_4_2	0,999874
F28A_4_3	0,999754
F28A_4_4	0,999995

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (Valor Total)		Ponto médio
	<desvio real estimado<	>desvio real estimado>	
F28A_4_1	-0,0800%	0,0800%	0,000%
F28A_4_2	-0,0774%	0,1126%	0,018%
F28A_4_3	-0,0354%	0,1246%	0,045%
F28A_4_4	-0,0995%	0,0705%	-0,015%
Média	-0,0731%	0,0969%	0,012%

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (NPV)		Ponto médio
	<desvio real estimado<	>desvio real estimado>	
F28A_4_1	-0,080%	0,080%	0,000%
F28A_4_2	-0,281%	-0,091%	-0,186%
F28A_4_3	-0,481%	-0,321%	-0,401%
F28A_4_4	-0,151%	0,070%	-0,041%
Média	-0,248%	-0,066%	-0,157%

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (Custos operacionais)		Ponto médio
	<desvio real estimado<	>desvio real estimado>	
F28A_4_1	-0,080%	0,0800%	0,000%
F28A_4_2	-0,291%	-0,091%	-0,191%
F28A_4_3	-0,521%	-0,321%	-0,421%
F28A_4_4	-0,121%	0,019%	-0,051%
Média	-0,253%	-0,078%	-0,166%

Instâncias	GAP (%)	
	Sequencial	Integrado
F28A_4_1	0,08%	0,08%
F28A_4_2	0,09%	0,10%
F28A_4_3	0,06%	0,10%
F28A_4_4	0,10%	0,07%

## ANEXO 4. – RESULTADOS DA INSTÂNCIA *F28B<sub>i</sub>*<sub>*j*</sub>

Instâncias	Indicadores	Modelo Sequencial	Modelo Integrado
F28B_1_1	Valor Total	335513,24	333758,09
	NPV	451682,16	451680,34
	Custos operacionais	116168,92	117922,25
	Tempo (segundos)	1776	3602
	Gap	0,00%	3,04%
F28B_1_2	Valor Total	342899,22	342596,64
	NPV	457947,28	457436,85
	Custos operacionais	115048,06	114840,21
	Tempo (segundos)	3582	3600
	Gap	0,06%	3,02%
F28B_1_3	Valor Total	339715,80	336125,17
	NPV	460685,66	460424,79
	Custos operacionais	120969,86	124299,62
	Tempo (segundos)	3600	3600
	Gap	0,00%	3,77%
F28B_1_4	Valor Total	342441,43	343228,05
	NPV	458465,83	457374,56
	Custos operacionais	116024,4	114146,51
	Tempo (segundos)	797	3600
	Gap	0,00%	2,42%

Parâmetro E	Instâncias				Médias
	F28B_1_1	F28B_1_2	F28B_1_3	F28B_1_4	
Valor Total	-0,526%	-0,088%	-1,068%	0,229%	-0,363%
NPV	-0,0004%	-0,112%	-0,057%	-0,239%	-0,102%
Custos operacionais	1,487%	-0,181%	2,679%	-1,645%	0,585%

Instâncias	Q
F28B_1_1	1,005259
F28B_1_2	1,000883
F28B_1_3	1,010682
F28B_1_4	0,997708

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (Valor Total)		Ponto médio
F28B_1_1	-0,5259%	<desvio real estimado<	2,5301%
F28B_1_2	-0,1484%		2,9343%
F28B_1_3	-1,0682%		2,7420%
F28B_1_4	0,2292%		2,6436%
Média	-0,3783%		2,7125%

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (NPV)		Ponto médio
F28B_1_1	0,000%	<desvio real estimado<	3,056%
F28B_1_2	-0,172%		2,911%
F28B_1_3	-0,057%		3,754%
F28B_1_4	-0,239%		2,176%
Média	-0,117%		2,974%

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (Custos operacionais)		Ponto médio
F28B_1_1	1,487%	<desvio real estimado<	4,543%
F28B_1_2	-0,241%		2,842%
F28B_1_3	2,679%		6,489%
F28B_1_4	-1,645%		0,769%
Média	0,570%		3,661%

Instância	GAP (%)	
	Sequencial	Integrado
F28B_1_1	0,00%	3,04%
F28B_1_2	0,06%	3,02%
F28B_1_3	0,00%	3,77%
F28B_1_4	0,00%	2,42%

Instâncias	Indicadores	Modelo Sequencial	Modelo Integrado
F28B_2_1	Valor Total	787195,37	786140,24
	NPV	903364,29	903360,66
	Custos operacionais	116168,92	117220,42
	Tempo (segundos)	2816	3601
	Gap	0,05%	1,14%
F28B_2_2	Valor Total	800846,49	800349,25
	NPV	915894,55	915671,87
	Custos operacionais	115894,06	115322,62
	Tempo (segundos)	2850	3600
	Gap	0,09%	1,19%
F28B_2_3	Valor Total	800401,58	799028,57
	NPV	921371,44	921046,26
	Custos operacionais	120969,86	122017,69
	Tempo (segundos)	2163	3601
	Gap	0,08%	1,28%
F28B_2_4	Valor Total	800907,36	799442,7
	NPV	916931,76	916842,97
	Custos operacionais	116024,4	117400,27
	Tempo (segundos)	910	3600
	Gap	0,08%	1,26%

Parâmetro E	Instâncias				Médias
	F28B_2_1	F28B_2_2	F28B_2_3	F28B_2_4	
Valor Total	-0,134%	-0,062%	-0,172%	-0,183%	-0,138%
NPV	0,000%	-0,024%	-0,035%	-0,010%	-0,017%
Custos operacionais	0,897%	-0,496%	0,859%	1,172%	0,608%

Instâncias	Q
F28B_2_1	1,001342
F28B_2_2	1,000621
F28B_2_3	1,001718
F28B_2_4	1,001832

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (Valor Total)		Ponto médio
F28B_2_1	-0,1843%	<desvio real estimado>	1,0073%
F28B_2_2	-0,1522%		1,1286%
F28B_2_3	-0,2520%		1,1104%
F28B_2_4	-0,2634%		1,0791%
Média	-0,2129%		1,0813%

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (NPV)		Ponto médio
F28B_2_1	-0,050%	<desvio real estimado>	1,141%
F28B_2_2	-0,114%		1,166%
F28B_2_3	-0,115%		1,247%
F28B_2_4	-0,090%		1,253%
Média	-0,093%		1,202%

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (Custos operacionais)		Ponto médio
F28B_2_1	0,847%	<desvio real estimado>	2,039%
F28B_2_2	-0,586%		0,695%
F28B_2_3	0,779%		2,141%
F28B_2_4	1,092%		2,434%
Média	0,533%		1,827%

Instância	GAP (%)	
	Sequencial	Integrado
F28B_2_1	0,05%	1,14%
F28B_2_2	0,09%	1,19%
F28B_2_3	0,08%	1,28%
F28B_2_4	0,08%	1,26%

Instâncias	Indicadores	Modelo Sequencial	Modelo Integrado
F28B_4_1	Valor Total	1690559,27	1689323,59
	NPV	1806728,63	1806728,63
	Custos operacionais	116168,92	117405,04
	Tempo (segundos)	2952	3600
	Gap	0,09%	0,56%
F28B_4_2	Valor Total	1716445,94	1716103,54
	NPV	1831789,20	1831789,20
	Custos operacionais	115343,26	115685,66
	Tempo (segundos)	3602	3600
	Gap	0,25%	0,53%
F28B_4_3	Valor Total	1721772,89	1720166,87
	NPV	1842742,75	1842716,89
	Custos operacionais	120969,86	122550,02
	Tempo (segundos)	2301	3600
	Gap	0,09%	0,64%
F28B_4_4	Valor Total	1717839,09	1718092,12
	NPV	1833863,49	1833685,90
	Custos operacionais	116024,4	115593,78
	Tempo (segundos)	2644	3600
	Gap	0,09%	0,47%

Parâmetro E	Instâncias				Médias
	F28B_4_1	F28B_4_2	F28B_4_3	F28B_4_4	
Valor Total	-0,073%	-0,020%	-0,093%	0,015%	-0,043%
NPV	0,000%	0,000%	-0,001%	-0,010%	-0,003%
Custos operacionais	1,053%	0,296%	1,289%	-0,373%	0,566%

Instâncias	Q
F28B_4_1	1,000731
F28B_4_2	1,0002
F28B_4_3	1,000934
F28B_4_4	0,999853

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (Valor Total)		Ponto médio
F28B_4_1	-0,1632%	<desvio real estimado>	0,4873%
F28B_4_2	-0,2700%		0,5102%
F28B_4_3	-0,1834%		0,5472%
F28B_4_4	-0,0753%		0,4847%
Média	-0,1730%		0,5073%

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (NPV)		Ponto médio
F28B_4_1	0,963%	<desvio real estimado>	1,613%
F28B_4_2	0,046%		0,826%
F28B_4_3	1,199%		1,930%
F28B_4_4	-0,463%		0,470%
Média	0,436%		1,210%

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (Custos operacionais)		Ponto médio
F28B_4_1	0,492%	<desvio real estimado>	1,6133%
F28B_4_2	- 0,234%		0,826%
F28B_4_3	0,649%		1,930%
F28B_4_4	- 0,842%		0,097%
Média	0,016%		1,117%

Instância	GAP (%)	
	Sequencial	Integrado
F28B_4_1	0,09%	0,56%
F28B_4_2	0,25%	0,53%
F28B_4_3	0,09%	0,64%
F28B_4_4	0,09%	0,47%

## ANEXO 5. – RESULTADOS DA INSTÂNCIA *F44<sub>i,j</sub>*

Instâncias	Indicadores	Modelo Sequencial	Modelo Integrado
F44_1_1	Valor Total	589011,49	590353,52
	NPV	789979,99	788496,82
	Custos operacionais	200968,5	198143,3
	Tempo (segundos)	3603	3601
	Gap	1,94%	3,15%
F44_1_2	Valor Total	597580,70	599900,78
	NPV	796285,44	794904,73
	Custos operacionais	198704,74	195003,95
	Tempo (segundos)	3602	3601
	Gap	1,99%	2,96%
F44_1_3	Valor Total	594527,52	594616,31
	NPV	793068,59	788873,04
	Custos operacionais	198541,07	194256,73
	Tempo (segundos)	3605	3602
	Gap	1,73%	3,05%
F44_1_4	Valor Total	585488,42	588783,57
	NPV	788586,63	787636,70
	Custos operacionais	203098,21	198853,13
	Tempo (segundos)	3607	3605
	Gap	2,41%	3,12%

Parâmetro E	Instâncias				Médias
	F44_1_1	F44_1_2	F44_1_3	F44_1_4	
Valor Total	0,227%	0,387%	0,015%	0,560%	0,297%
NPV	-0,188%	-0,174%	-0,532%	-0,121%	-0,254%
Custos operacionais	-1,426%	-1,898%	-2,206%	-2,135%	-1,916%

Instâncias	Q
F44_1_1	0,997727
F44_1_2	0,996133
F44_1_3	0,917276
F44_1_4	0,994403

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (Valor Total)		Ponto médio	
F44_1_1	-1,7083%	<desvio real estimado<	3,3702%	0,831%
F44_1_2	-1,5956%		3,3353%	0,870%
F44_1_3	-1,7148%		11,0701%	0,675%
F44_1_4	-1,8369%		3,6622%	0,913%
Média	0,3862%		5,3594%	2,873%

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (NPV)		Ponto médio	
F44_1_1	-2,124%	<desvio real estimado<	2,955%	0,416%
F44_1_2	-2,156%		2,775%	0,309%
F44_1_3	-2,119%		2,266%	0,074%
F44_1_4	-2,517%		2,982%	0,232%
Média	-2,229%		2,744%	0,258%

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (Custos operacionais)		Ponto médio	
F44_1_1	-3,361%	<desvio real estimado<	1,717%	-0,822%
F44_1_2	-3,880%		1,051%	-1,415%
F44_1_3	-3,792%		0,592%	-1,600%
F44_1_4	-4,531%		0,968%	-1,782%
Média	-3,891%		1,082%	-1,405%

Instância	GAP (%)	
	Sequencial	Integrado
F44_1_1	1,94%	3,15%
F44_1_2	1,99%	2,96%
F44_1_3	1,73%	3,05%
F44_1_4	2,41%	3,12%

Instâncias	Indicadores	Modelo Sequencial	Modelo Integrado
F44_2_1	Valor Total	1378991,40	1379382,58
	NPV	1579959,90	1579747,11
	Custos operacionais	200968,5	200564,11
	Tempo (segundos)	6279	3602
	Gap	0,76%	1,23%
F44_2_2	Valor Total	1393866,16	1395726,23
	NPV	1592570,90	1591990,52
	Custos operacionais	198704,74	196264,29
	Tempo (segundos)	3602	3602
	Gap	0,93%	1,19%
F44_2_3	Valor Total	1386812,08	1388009,65
	NPV	1586137,29	1586020,47
	Custos operacionais	199325,21	198010,82
	Tempo (segundos)	3602	3601
	Gap	0,84%	1,15%
F44_2_4	Valor Total	1377663,23	1378909,73
	NPV	1577173,18	1576039,17
	Custos operacionais	199509,95	197129,44
	Tempo (segundos)	3602	3601
	Gap	0,81%	1,18%

Parâmetro E	Instâncias				Médias
	F44_2_1	F44_2_2	F44_2_3	F44_2_4	
Valor Total	0,028%	0,133%	0,086%	0,090%	0,085%
NPV	-0,013%	-0,036%	-0,007%	-0,072%	-0,032%
Custos operacionais	-0,202%	-1,243%	-0,664%	-1,208%	-0,829%

Instâncias	Q
F44_2_1	0,999716
F28B_2_2	0,998667
F28B_2_3	0,999137
F28B_2_4	0,999096

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (Valor Total)		Ponto médio
F44_2_1	-0,7314%	<desvio real estimado<	1,2580%
F44_2_2	-0,7955%		2,0907%
F44_2_3	-0,7530%		1,2353%
F44_2_4	-0,7189%		1,2693%
Média	-0,7497%		1,4633%

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (NPV)		Ponto médio
F44_2_1	-0,773%	<desvio real estimado<	1,216%
F44_2_2	-0,965%		1,921%
F44_2_3	-0,847%		1,142%
F44_2_4	-0,881%		1,107%
Média	-0,867%		1,346%

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (Custos operacionais)		Ponto médio
F44_2_1	-0,961%	<desvio real estimado<	1,028%
F44_2_2	-2,172%		0,714%
F44_2_3	-1,503%		0,485%
F44_2_4	-2,017%		-0,029%
Média	-1,663%		0,550%

Instância	GAP (%)	
	Sequencial	Integrado
F44_2_1	0,76%	1,23%
F44_2_2	0,93%	1,96%
F44_2_3	0,84%	1,15%
F44_2_4	0,81%	1,18%

Instâncias	Indicadores	Modelo Sequencial	Modelo Integrado
F44_4_1	Valor Total	2958491,18	2957419,9
	NPV	3159919,69	3159494,12
	Custos operacionais	201428,51	202074,22
	Tempo (segundos)	3602	3601
	Gap	0,36%	0,64%
F44_4_2	Valor Total	2986437,06	2988361,68
	NPV	2185141,80	3185012,67
	Custos operacionais	198704,74	196650,99
	Tempo (segundos)	3602	3601
	Gap	0,44%	0,46%
F44_4_3	Valor Total	2972949,25	2973657
	NPV	3172274,46	3172274,46
	Custos operacionais	199325,21	198617,46
	Tempo (segundos)	3603	3601
	Gap	0,38%	0,48%
F44_4_4	Valor Total	2954836,47	2956134,47
	NPV	3154246,42	3154095,39
	Custos operacionais	199509,95	197960,92
	Tempo (segundos)	3601	3600
	Gap	0,39%	0,50%

Parâmetro E	Instâncias				Médias
	F44_4_1	F44_4_2	F44_4_3	F44_4_4	
Valor Total	-0,036%	0,064%	0,024%	0,044%	0,024%
NPV	-0,013%	31,393%	0,000%	-0,005%	7,844%
Custos operacionais	0,320%	-1,044%	-0,356%	-0,782%	-0,466%

Instâncias	Q
F44_4_1	1,000362
F44_4_2	0,999356
F44_4_3	0,999762
F44_4_4	0,999561

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (Valor Total)		Ponto médio
F44_4_1	-0,3964%	<desvio real estimado<	0,6040%
F44_4_2	-0,3753%		0,5241%
F44_4_3	-0,3561%		0,5037%
F44_4_4	-0,3459%		0,5437%
Média	-0,3684%		0,5439%

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (NPV)		Ponto médio
F44_4_1	-0,041%	<desvio real estimado<	0,960%
F44_4_2	-1,484%		-0,585%
F44_4_3	-0,736%		0,124%
F44_4_4	-1,172%		0,500%
Média	-0,858%		0,250%

Instâncias	Intervalo do desvio real estimado (Custos operacionais)		Ponto médio
F44_4_1	-0,321%	<desvio real estimado<	0,9598%
F44_4_2	-1,504%		-0,585%
F44_4_3	-0,836%		0,124%
F44_4_4	-1,282%		-0,283%
Média	-0,986%		0,054%

Instância	GAP (%)	
	Sequencial	Integrado
F44_4_1	0,36%	0,64%
F44_4_2	0,44%	0,46%
F44_4_3	0,38%	0,48%
F44_4_4	0,39%	0,50%