

2019-04

# HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA PLANIFICACIÓN DEL PROCESO DE COSECHA DE UVAS EN LA PRODUCCIÓN DE VINO CONSIDERANDO TURNOS Y ESTABILIDAD LABORAL

SFEIR YACHAN, IGNACIO ANDRÉS

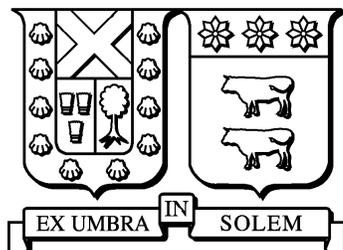
---

<https://hdl.handle.net/11673/49443>

*Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA*

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA  
SANTIAGO – CHILE



“HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA  
ARTIFICIAL PARA LA PLANIFICACIÓN DEL  
PROCESO DE COSECHA DE UVAS EN LA  
PRODUCCIÓN DE VINO CONSIDERANDO  
TURNOS Y ESTABILIDAD LABORAL”

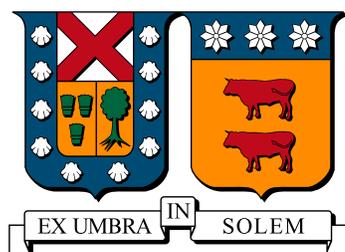
IGNACIO ANDRÉS SFEIR YACHAN

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL INFORMÁTICO

PROFESOR GUÍA: ELIZABETH MONTERO

ABRIL 2019

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA**  
**SANTIAGO – CHILE**



**“HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA  
ARTIFICIAL PARA LA PLANIFICACIÓN DEL  
PROCESO DE COSECHA DE UVAS EN LA  
PRODUCCIÓN DE VINO CONSIDERANDO  
TURNOS Y ESTABILIDAD LABORAL”**

**IGNACIO ANDRÉS SFEIR YACHAN**

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL INFORMÁTICO**

**PROFESOR GUÍA: ELIZABETH MONTERO**  
**PROFESOR CORREFERENTE: CLAUDIO LOBOS**

**ABRIL 2019**

**MATERIAL DE REFERENCIA, SU USO NO INVOLUCRA RESPONSABILIDAD DEL AUTOR O DE LA INSTITUCIÓN**

# Agradecimientos

Quisiera agradecer a la profesora Elizabeth Montero, a quien recurrí como profesora guía por sus ganas y compromiso, aspectos en los cuales sin duda cumplió mis expectativas, ayudándome a definir y redefinir a lo largo de este trabajo. Muchas gracias también al profesor Claudio Lobos, referente y con quien conocí el gusto por la informática en el ramo de Programación en primer año. Al profesor José Luis Martí por su calidad como docente y gran disposición a lo largo de estos años.

Gracias a mis amigos e irremplazables compañeros de trabajos y estudio, sin los que llegar a este punto no me habría sido posible. Al departamento de DEFIDER por hacer infinitamente más grato este proceso, lleno de grandes profesionales y amigos.

Muchas gracias a mi familia por apoyarme siempre, especialmente en los no pocos momentos difíciles. Los quiero.

# Resumen

El rubro de la agricultura, específicamente en el área estratégica, ha sido históricamente resistente al uso de nuevas tecnologías para el soporte de la toma de decisiones, apegándose al tradicional “buen juicio” del administrador, pero en los últimos años esto ha ido cambiando. En este trabajo se discute sobre el problema de optimización relacionado con el período de cosecha de uvas para vino, buscando una solución en base a un proceso objetivo de análisis de la información disponible.

Existe trabajo previo en el área de cosecha de frutos y su planeación a nivel estratégico, pero no es un tema estudiado abundantemente. Las estrategias mayormente utilizadas se basan en algoritmos de búsqueda completa de soluciones, lo cual si bien permite encontrar la mejor solución posible requiere una simplificación del problema, alejándolo de la realidad.

En este trabajo se estudia una versión del problema de cosecha de viñedos que considera el deterioro de la uva en el tiempo y la posibilidad de cosechar de forma manual o con maquinaria. Se modela y resuelve el problema usando el solver Gurobi con lo que se identifican los casos complejos de resolver. Además se presenta un algoritmo de tipo GRASP con Hill Climbing que construye múltiples soluciones y las va modificando. De esta forma se explora gran parte del espacio de búsqueda, partiendo de diversos estados iniciales e intentando explotar al máximo cada uno.

Se comparan los resultados del algoritmo para diversas instancias o situaciones posibles de la viña como el tamaño y la capacidad de procesamiento de la uva, incluyendo una instancia similar a trabajos previos análogos, evaluando qué condiciones son las que más fuertemente afectan al resultado final.

# Abstract

The agriculture market, specifically in the strategic area, has historically been resilient to the use of new technologies that support decision making. In most cases it is still attached to the traditional “good judgement” of the field’s manager. In recent years this has been changing. This thesis will discuss the optimization problem related with the grape-harvesting time-period, searching for a solution based on an objective analysis of the available information.

There is previous work in the fruit harvesting area and its strategic planning, but it’s not a thoroughly studied subject. Their strategies are mostly based on exact algorithms, which are meant to find the best possible solution, but also require the problem to be simplified, distancing it from reality.

In this thesis a version of the vineyard’s harvesting problem will be studied, which considers grape deterioration through time and the possibility to harvest manually or using machinery. The problem is modeled and solved using Gurobi solver to identify complex solution cases. Also, an algorithm is presented using GRASP with Hill Climbing that builds multiple solutions and then starts modifying them. In this way most of the search space is explored, by starting from different initial states and then trying to exploit each one to their fullest.

The algorithm’s results are compared for diverse instances of possible scenarios of the vineyard’s varying size and grape processing capacity. Moreover, an instance similar to previous studies is evaluated to determine which conditions are the most critical for the final result.

# Índice de Contenidos

<b>Agradecimientos</b>	<b>III</b>
<b>Resumen</b>	<b>IV</b>
<b>Abstract</b>	<b>V</b>
<b>Índice de Contenidos</b>	<b>VI</b>
<b>Lista de Tablas</b>	<b>VIII</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>XIII</b>
<b>Lista de Algoritmos</b>	<b>XIV</b>
<b>Índice de Contenidos</b>	<b>XIV</b>
<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1. Definición del Problema</b>	<b>3</b>
1.1. Modelo Matemático . . . . .	6
1.1.1. Constantes . . . . .	6
1.1.2. Variables . . . . .	7
1.1.3. Restricciones . . . . .	8
1.1.4. Función Objetivo . . . . .	8

<b>2. Estado del Arte</b>	<b>11</b>
<b>3. Propuesta e Implementación</b>	<b>23</b>
3.1. Descripción del algoritmo . . . . .	23
3.1.1. GRASP y Hill Climbing . . . . .	24
3.1.2. Representación . . . . .	25
3.1.3. Construcción inicial . . . . .	27
3.1.4. Movimientos . . . . .	28
<b>4. Experimentos y Resultados</b>	<b>37</b>
4.1. Escenarios . . . . .	38
4.2. Escenario 1: 13 Días y 20 Sectores . . . . .	40
4.2.1. Instancia 1: Escenario 1 con 2 periodos al día . . . . .	40
4.2.2. Instancia 1: Solver Gurobi . . . . .	53
4.2.3. Instancia 2: Escenario 1 con 4 periodos al día . . . . .	58
4.2.4. Instancia 2: Solver Gurobi . . . . .	64
4.3. Escenario 2: 13 Días y 40 Sectores . . . . .	64
4.3.1. Instancia 3: Escenario 2 con 2 periodos al día . . . . .	69
4.3.2. Instancia 3: Solver Gurobi . . . . .	72
4.3.3. Instancia 4: Escenario 2 con 4 periodos al día . . . . .	75
4.3.4. Instancia 4: Solver Gurobi . . . . .	77
4.4. Escenario 3: 17 Días y 40 Sectores . . . . .	77
4.4.1. Instancia 5: Escenario 3 con 2 Periodos al día . . . . .	78
4.4.2. Instancia 5: Solver Gurobi . . . . .	82
4.4.3. Instancia 6: Escenario 3 con 4 Periodos al día . . . . .	84
4.4.4. Instancia 6: Solver Gurobi . . . . .	89
<b>Conclusiones</b>	<b>90</b>

# Índice de Tablas

2.1. Resumen de las características de cada investigación. n/e: no especificado. . . . .	21
4.1. Características de cada escenario implementado. . . . .	39
4.2. Características de cada sector para el primer escenario. . . . .	41
4.3. Resultados generales para la planificación de la instancia 1. . . . .	42
4.4. Planificación del algoritmo propuesto para la cosecha diaria (en kg de producto) por sector para la instancia 1. En negrita se indica el día óptimo de cada sector. . . . .	43
4.5. Comparación de los resultados generales entre la planificación de la construcción inicial y de la solución final para la instancia 1. . . . .	45
4.6. Contrataciones utilizadas en la construcción inicial (antes de aplicar Hill Climbing) por periodo para cubrir los sectores con óptimo entre los días 4, 5 y 6. . . . .	46
4.7. Tipos de movimientos aplicados en la instancia 1. . . . .	46
4.8. Contrataciones utilizadas por periodo para cubrir los sectores 6,7 y 11 de la primera instancia, la suma de contrataciones entre dichos sectores, y por último su porcentaje del total de contrataciones entre todos los sectores. . . . .	48
4.9. Distribución de los trabajadores variables por periodo en la planificación de la instancia 1. . . . .	49

4.10. Distribución de los trabajadores fijos por periodo en la planificación de la instancia 1. . . . .	51
4.11. Distribución de las vendimiadoras. . . . .	52
4.12. Comparación de los resultados generales entre la planificación del algoritmo propuesto y la de Gurobi para la instancia 1. . . . .	53
4.13. Planificación de Gurobi para la cosecha diaria (en kg de producto) por sector para la instancia 1. En negrita se indica el día óptimo de cada sector. . . . .	54
4.14. Distribución de los trabajadores variables por periodo en la planificación de Gurobi para la instancia 1. . . . .	55
4.15. Contrataciones utilizadas para los resultados de Gurobi por periodo para cubrir los sectores 6, 7 y 11 de la primera instancia, la suma de contrataciones entre dichos sectores, y por último su porcentaje del total de contrataciones entre todos los sectores. . . . .	56
4.16. Distribución de los trabajadores fijos por periodo en la planificación de Gurobi para la instancia 1. . . . .	57
4.17. Resultados generales para la planificación de la instancia 2. . . . .	58
4.18. Detalle de costos para los resultados generales de la planificación de la instancia 2. . . . .	59
4.19. Tipos de movimientos aplicados en la instancia 2. . . . .	59
4.20. Planificación del algoritmo propuesto para la cosecha diaria (en kg de producto) por sector para la instancia 2. En negrita se indica el día óptimo de cada sector. . . . .	60
4.21. Distribución de los trabajadores variables por periodo en la planificación de Gurobi para la instancia 2. (Parte 2: D8-D13) . . . . .	62
4.22. Distribución de los trabajadores variables por periodo en la planificación de Gurobi para la instancia 2. (Parte 1: D1-D7) . . . . .	63

4.23. Comparación de los resultados generales entre la planificación del algoritmo propuesto y la de Gurobi para la instancia 2. . . . .	64
4.24. Distribución de los trabajadores variables por periodo en la planificación de Gurobi para la instancia 2. (Parte 2: D8-D13) . . . . .	65
4.25. Distribución de los trabajadores variables por periodo en la planificación de Gurobi para la instancia 2. (Parte 1: D1-D7) . . . . .	66
4.26. Características de cada sector para el segundo escenario. . . . .	67
4.27. Planificación del algoritmo propuesto para la cosecha diaria (en kg de producto) por sector para la instancia 3. En negrita se indica el día óptimo de cada sector. . . . .	68
4.28. Comparación de los resultados generales entre la planificación de la construcción inicial y de la solución final para la instancia 3. . . . .	70
4.29. Detalle de costos para los resultados generales de la planificación de la instancia 3. . . . .	70
4.30. Tipos de movimientos aplicados en la instancia 3. . . . .	71
4.31. Comparación de los resultados generales entre la planificación del algoritmo propuesto y la de Gurobi para la instancia 3. . . . .	72
4.32. Distribución de los trabajadores variables por periodo en la planificación de la instancia 3. . . . .	73
4.33. Distribución de los trabajadores variables por periodo en la planificación de Gurobi para la instancia 3. . . . .	74
4.34. Comparación de los resultados generales entre la planificación de la construcción inicial y de la solución final para la instancia 4. . . . .	75
4.35. Detalle de costos para los resultados generales de la planificación de la instancia 4. . . . .	75
4.36. Tipos de movimientos aplicados en la instancia 4. . . . .	76

4.37. Comparación de los resultados generales entre la planificación del algoritmo propuesto y la de Gurobi para la instancia 4. . . . .	77
4.38. Características de cada sector para el tercer escenario. . . . .	79
4.39. Comparación de los resultados generales entre la planificación de la construcción inicial y de la solución final para la instancia 5. . . . .	80
4.40. Tipos de movimientos aplicados en la instancia 5. . . . .	80
4.41. Planificación del algoritmo propuesto para la cosecha diaria (en kg de producto) por sector para la instancia 5. En negrita se indica el día óptimo de cada sector. . . . .	81
4.42. Comparación de los resultados generales entre la planificación del algoritmo propuesto y la de Gurobi para la instancia 5. . . . .	82
4.43. Distribución de los trabajadores variables por periodo en la planificación de la instancia 5. . . . .	83
4.44. Comparación de los resultados generales entre la planificación de la construcción inicial y de la solución final para la instancia 6. . . . .	84
4.45. Distribución de los trabajadores variables por periodo en la planificación de Gurobi para la instancia 5. (Parte 2: D11-D17) . . . . .	85
4.46. Distribución de los trabajadores variables por periodo en la planificación de Gurobi para la instancia 5. (Parte 1: D1-D10) . . . . .	86
4.47. Planificación del algoritmo propuesto para la cosecha diaria (en kg de producto) por sector para la instancia 6. En negrita se indica el día óptimo de cada sector. . . . .	87
4.48. Detalle de costos para los resultados generales de la planificación de la instancia 6. . . . .	88
4.49. Tipos de movimientos aplicados en la instancia 6. . . . .	88

4.50. Comparación de los resultados generales entre la planificación del algoritmo  
propuesto y la de Gurobi para la instancia 6. . . . . 89

# Índice de Figuras

1.1. Mapa referencial de un viñedo que muestra sus sectores, lagares y rutas entre estos. Figura obtenida de <i>Ferrer et al. (2008)</i> [1]. . . . .	4
3.1. Esquema lógico del procedimiento GRASP propuesto. . . . .	26
4.1. Proceso de convergencia a la solución final para la instancia 1. . . . .	47
4.2. Proceso de convergencia a la solución final para la instancia 2. . . . .	61
4.3. Proceso de convergencia a la solución final para la instancia 3. . . . .	71
4.4. Proceso de convergencia a la solución final para la instancia 4. . . . .	76
4.5. Proceso de convergencia a la solución final para la instancia 5. . . . .	82
4.6. Proceso de convergencia a la solución final para la instancia 6. . . . .	88

# Índice de Contenidos

3.1. Pseudocódigo del algoritmo GRASP. . . . .	24
3.2. Pseudocódigo del algoritmo Hill Climbing. . . . .	24
3.3. Pseudocódigo del proceso constructivo inicial. . . . .	29
3.4. Pseudocódigo del primer movimiento. . . . .	31
3.5. Pseudocódigo del segundo movimiento. . . . .	32
3.6. Pseudocódigo del tercer movimiento. . . . .	34
3.7. Pseudocódigo del cuarto movimiento. . . . .	35
3.8. Pseudocódigo del quinto movimiento. . . . .	36

# Introducción

En el problema de planificación del período de cosecha de uvas para la producción de vino, el objetivo es maximizar las utilidades, es decir, encontrar el mejor equilibrio entre las ganancias y los costos. Para esto se establecen dos objetivos que no siempre están de acuerdo entre sí. Por parte del administrador de la viña se busca minimizar el costo operacional para el proceso de cosecha, el cual se desglosa en costos de máquinas vendimiadoras, costo de trabajadores y de transporte. Por otro lado, el enólogo busca maximizar la calidad del vino a producir. Este conflicto se produce ya que el enólogo define una fecha óptima para cosechar la uva, sin embargo esta fecha no puede ser siempre cumplida sin aumentar el costo operacional debido a altas concentraciones de trabajo asignado en una misma fecha. Así, se recurre a una función de pérdida de calidad que describe como el precio de la uva disminuye con respecto a la cantidad de días de desviación de la fecha óptima para cosecharla (*Bordeu et al. (2002)* [14]). Esta función se utiliza para contrapesar la pérdida de calidad con mayor eficiencia operacional, así, la eficiente distribución de la mano de obra y maquinaria es fundamental para el proceso. Se considera su disponibilidad, productividad y costo por hora para generar un itinerario donde se distribuye el trabajo dentro del horizonte de días de planeación de la cosecha, asignando para cada día la cantidad de producto y el tipo de trabajo que se utilizará (máquina y/o manual) para cosecharlo.

Otras restricciones a considerar son la capacidad de procesamiento de la bodega, donde esta última es relevante ya que no existe la posibilidad de inventario de la fruta cosechada debido a su rápido deterioro. La cosecha se debe procesar completa dentro del mismo día, lo cual puede limitar fuertemente las posibilidades de organización, ya que impone un máximo de cosecha diaria.

Muchos de los factores mencionados pueden cambiar dentro del plazo del proceso, a medida que se adquiere nueva información. Por ejemplo, el día exacto óptimo para la cosecha puede no estar claro hasta sólo unos días antes, lo mismo sucede con los aspectos meteorológicos. Por esto es necesario que sea posible modificar el itinerario en tiempo real.

En este trabajo se estudia una versión del problema de cosecha de uva enfocada en la planificación disponiendo de trabajadores manuales y máquinas vendimiadoras, considerando turnos de trabajo durante el día, transporte de trabajadores entre sectores y estabilidad laboral a través de la fidelización del personal. Para esto se implementa un modelo en Gurobi que permite entender la complejidad de resolver bajo distintas circunstancias.

Además, se propone un algoritmo de búsqueda local de tipo GRASP para generar el itinerario de trabajo ya que esta metodología permite encontrar buenas soluciones al problema de forma rápida, siendo capaz de adaptarse a cambios de último minuto en la información y reorganizar el itinerario, además de ofrecer múltiples alternativas de solución. Ambas propuestas se prueban con diferentes escenarios y se concluye respecto a la dificultad del problema y la capacidad de ambas para encontrar soluciones de calidad.

# Capítulo 1

## Definición del Problema

El problema de planificación de cosecha para diversos frutos involucra la toma de múltiples decisiones complejas. Estas decisiones han sido tradicionalmente tomadas por el administrador del campo, por lo que en los últimos años se han explorado nuevas posibilidades que aprovechan las nuevas tecnologías disponibles para generar sistemas orientados a soportar la toma de decisiones (*Altieri, Faeth (1994) [13]*). Estos sistemas son basados en modelos matemáticos (*France, Thornley (1984) [15]*) que procesan la información enfocándose en algún objetivo en particular como la maximización de utilidades o el cumplimiento de cierta meta (*Glen (1987) [16]*).

### **Planificación del período de cosecha de uvas para la producción de vino.**

El problema de planificación del periodo de cosecha de uvas para la producción de vino consiste en determinar los tiempos en que se cosecharán los distintos sectores de un viñedo. Esto se vuelve un problema dado que cada sector tiene condiciones particulares como la cepa, distintas fechas de plantación, terreno, etc. Esto lleva a que distintos sectores tengan distintas fechas óptimas de cosecha, razón por la cual nace el problema de planificación. Además se debe maximizar el uso de la mano de obra disponible y promover la cosecha de cada sector en su día óptimo.

En este problema se presentan dos grandes objetivos. Por un lado maximizar las ganancias



para cada sector, el precio del producto según la calidad de la cepa y su estado que se ve afectado por algún desvío en la fecha de cosecha óptima. Además se requiere una matriz de adyacencia donde se muestren las rutas y distancias entre sectores y lagares. Un lagar es donde se procesa la uva recién cosechada, el cual tiene una capacidad diaria limitada y se encuentra generalmente ubicado dentro de la misma viña.

- **La productividad de los trabajadores y maquinaria** donde se incluye la capacidad diaria de los lagares donde se procesa la uva, el costo y capacidad por hora tanto de las máquinas vendimiadoras como también de ambos tipos de trabajadores (fijos y variables), y el costo tanto monetario como temporal de transportar a los trabajadores y vendimiadoras entre sectores durante el día.
- **Detalles del proceso de cosecha** como el número de días de planificación, la cantidad de horas de trabajo al día y en cuantos turnos/periodos se desea separar cada día con el fin de estructurar con mayor o menor rigidez el itinerario a generar.

Además, el proceso debe cumplir con ciertos parámetros o restricciones intrínsecos a las características recién mencionadas:

- Toda la uva debe ser cosechada, es decir, debe haber suficiente mano de obra para cubrir la demanda dentro del plazo establecido.
- Cosechar dentro del plazo del sector. Cada sector, dependiendo de las características de la cepa y la madurez de la uva tiene un rango de días para ser cosechada en buen estado. Antes de este la uva está demasiado verde, y después demasiado madura para producir vino de calidad.
- Usar el modo de trabajo adecuado al sector. Esta restricción implica que para algunos sectores se realice cosecha sólo con máquinas vendimiadoras y otros sólo con trabajo manual. Esto ya sea por evitar daños en la plantación, por características geográficas o alguna característica de la cepa.
- No sobrepasar la capacidad diaria de los lagares. Debido a que la uva cosechada se deteriora rápidamente, debe ser enviada a procesamiento dentro del mismo día, y para esto debe haber al menos un lagar con capacidad disponible.

A diferencia de lo estudiado en la literatura, una consideración importante que se tomará en este estudio es que las contrataciones se realizarán por periodos ininterrumpidos de tiempo, lo cual implica que una vez calculado el número necesario de trabajadores a contratar para satisfacer la solución encontrada, se les pagará a todos ellos por asistir todos los días que sean necesarios, independientemente de que no todos sean requeridos cada día. Esto asegura empleos más estables beneficiando al trabajador y también asegurando que las mismas personas se encuentren disponibles todos los días, adquiriendo experiencia en el viñedo y evitando repetir periodos de capacitación, generando mayor confianza en la calidad de su trabajo, por lo que es beneficioso para ambos lados.

Para entender y estudiar formalmente el problema, se define el siguiente modelo:

## **1.1. Modelo Matemático**

A continuación se presenta el modelo matemático que describe el problema de planificación de cosecha específico que se estudiará en este trabajo.

### **1.1.1. Constantes**

- S: Información de los sectores. Cantidad de producto [kg], tipo de cepa plantada, tipo de trabajo permitido (máquina y/o manual), fecha óptima de cosecha y rango viable de cosecha.
- A: Adyacencia de los sectores. Rutas y distancias.
- C: Información de las cepas. Precio base y curva de deterioro precio/calidad con el tiempo.
- L: Información de los lagares. Capacidad diaria.
- T: Información de los trabajadores. Cantidad de trabajadores fijos disponibles, su productividad y costo por hora y la de cada nueva contratación necesaria para cubrir la demanda.

- V: Información de las máquinas vendimiadoras. Cantidad disponible junto con su productividad y costo de uso por hora.
- R: Información de los remolques. Capacidad de transporte por viaje y su costo por kilómetro.
- nS: Número de sectores.
- nC: Número de cepas.
- nL: Número de lagares.
- nV: Número de vendimiadoras.
- nT: Número de tipos de trabajadores (fijo y variable).
- nTF: Número de trabajadores fijos disponibles.
- nD: Número de días del horizonte de planeación de la cosecha.
- nP: Número de periodos al día.
- nH: Número de horas de trabajo al día.

### 1.1.2. Variables

Las variables se componen dentro de la matriz entera de 5 dimensiones:

$$sol_{stlp} = a$$

Donde **s** representa el sector cosechado, **t** el tipo de trabajador (fijo o variable) o vendimiadora usada, **l** es el lagar al que se envía, **d** es el día en que se realiza y **p** es el período específico dentro de dicho día.

Por lo tanto si  $sol_{stlp} > 0$  entonces **a** es la cantidad de producto cosechado para dichas especificaciones.

### 1.1.3. Restricciones

1. Todo debe ser cosechado.

$$\sum_{t=1}^{nV+nT} \sum_{l=1}^{nL} \sum_{d=1}^{nD} \sum_{p=1}^{nP} sol_{stdp} = Cap(S_s) \quad \forall s \quad (1.1)$$

2. Cosechar dentro del plazo del sector.

$$sol_{stdp} > 0 \quad , \quad d \in Plazo(S_s) \quad (1.2)$$

3. Usar el modo de trabajo adecuado al sector (máquina, manual o mixto)

$$sol_{stdp} > 0 \quad , \quad t \in Modo(S_s) \quad (1.3)$$

4. No sobrepasar la capacidad diaria de los lagares.

$$\sum_{s=1}^{nS} \sum_{t=1}^{nV+nT} \sum_{p=1}^{nP} sol_{stdp} \leq Cap(L_l) \quad \forall l, d \quad (1.4)$$

### 1.1.4. Función Objetivo

Consiste en maximizar las utilidades, es decir, maximizar ganancias cosechando cerca del día óptimo y minimizar costos operacionales.

$$Utilidades = Ganancias - Costos \quad (1.5)$$

**Ganancias:** Cantidad cosechada de cada cepa multiplicada por su precio, que depende también de la cantidad de días de desvío del óptimo ( $\Delta d$ ), o bien:

$$Ganancia = \sum_{s=1}^{nS} \sum_{t=1}^{nV+nT} \sum_{l=1}^{nL} \sum_{d=1}^{nD} \sum_{p=1}^{nP} (sol_{stdp} \cdot Precio(C_{s\Delta d})) \quad (1.6)$$

Donde  $Precio(C_{s\Delta d})$  se refiere al ingreso que significa vender la cepa que hay en el sector  $s$  con un desvío de  $\Delta d$  días del óptimo para dicho sector, con  $\Delta d$  calculado a partir del día  $d$  de cosecha y la información del sector  $s$ .

**Costos:** Las máquinas vendimiadoras tienen asociado un costo y productividad por hora de uso, entonces el costo operacional es calculado según la cantidad de cosecha realizada con cada una, dividida por su productividad y multiplicada por su costo, es decir:

$$Costo\ Vendimiadoras = \sum_{s=1}^{nS} \sum_{v=1}^{nV} \sum_{l=1}^{nL} \sum_{d=1}^{nD} \sum_{p=1}^{nP} \left( \frac{sol_{svldp}}{Productividad(V_v)} \cdot Costo(V_v) \right) \quad (1.7)$$

Donde  $Productividad(V_v)$  se refiere a la cantidad de cosecha que realiza la vendimiadora  $v$  en una hora. De forma similar,  $Costo(V_v)$  es equivalente al costo por utilizar la vendimiadora  $v$  por una hora.

Los trabajadores fijos son full time por lo que se les paga durante todo el horizonte de días, independiente de su cosecha producida.

$$Costo\ T.\ Fijos = Costo(T_t) \cdot nH \cdot nD \cdot nTF \quad , t = 1 \quad (1.8)$$

Y luego, a los trabajadores variables a contratar se les paga todos los días desde el primer día que requiera contrataciones hasta el último en que sean necesarias (número que se denominará por  $nDt2$ ), por lo que se calcula primero la cantidad de trabajadores requeridos (denominado  $nTC$ ) y se multiplica por su respectivo costo diario.

$$Costo\ T.\ Contratados = Costo(T_t) \cdot nH \cdot nDt2 \cdot nTC \quad , t = 2 \quad (1.9)$$

El último costo a considerar es el de transporte de los trabajadores y maquinaria desde un sector a otro entre los periodos del día. Este costo dependerá de la distancia entre el sector de inicio  $s_1$  y destino  $s_2$ , para lo cual se recurre a la matriz de adyacencia  $A$  y se le aplica un algoritmo Dijkstra para encontrar las rutas óptimas, expresadas como  $d(s_1, s_2)$ . Además, el costo por kilometro ( $ck$ ) de transportar uno o más trabajadores es menor al de transportar una máquina vendimiadora, por lo que cada tipo de trabajo se define por separado con la

letra  $t$ , resultando en un costo igual a  $ck(t)$ . Luego se calcula la cantidad de trabajadores (o máquinas) de tipo  $t$  a transportar para cada día y periodo ( $ctt_{dpts_1s_2}$ ). Entonces, el costo de transporte se define como:

$$Costo\ Transporte = \sum_{d=1}^{nD} \sum_{p=1}^{nP} ctt_{dpts_1s_2} \cdot ck(t) \cdot d(s_1, s_2) \quad \forall t, s_1 \neq s_2 \quad (1.10)$$

# Capítulo 2

## Estado del Arte

Recientemente se han realizado numerosos estudios sobre la creación de sistemas de toma de decisiones para la agricultura, a continuación se presentan algunos de los más relevantes que se han encontrado, con relación al problema planteado anteriormente. Cabe destacar que el enfoque de este artículo está en el proceso de cosecha como tal, y no el resto de la cadena de suministro, como lo es el transporte del producto terminado al consumidor o estrategias que consideran oferta y demanda.

En primer lugar, se encuentra información relevante en la cosecha de otros frutos además de la uva, como se expone a continuación:

El caso de *Herrera et al. (2017)* [3] que estudia la cosecha de aceitunas para la producción de aceite de oliva de un caso en Chile resulta interesante debido a que muchas condiciones son aplicables al problema de las uvas. Se define un período de 15 días para cosechar dos grupos de aceitunas, que en conjunto tienen 4 variedades distintas.

La posibilidad de lluvia es relevante ya que las aceitunas sufren daños, y además ciertas maquinas no pueden ser utilizadas, generando la pérdida de un porcentaje de la cosecha, del cual la compañía estudiada está consciente pero no tiene métodos o herramientas eficientes para manejar todos los posibles escenarios.

Otra similitud es que no existe inventario, toda la cosecha debe ser procesada en la planta

el mismo día que fue extraída. La planta tiene capacidad para 310 toneladas al día, y puede extraer el aceite de hasta 3 variedades de aceitunas al día, por lo cual es necesario coordinar el proceso de tal forma que no se cosechen las 4 variedades el mismo día. Este podría ser un subproblema a considerar también en el ámbito de la uva ya que se tiene también una gran variedad de cepas que pasan por procesos distintos dependiendo de su calidad.

En cuanto a los resultados, tomando en consideración la pérdida de aceitunas por motivos climáticos, el modelo logra extraer 4,6 % más aceite que el plan original de la empresa, al mismo costo. Además, el presupuesto disponible a mano es un factor importante para la calidad de la función objetivo, la cual aumenta de forma directamente proporcional al presupuesto hasta llegar a una extracción de 537,9 toneladas con un presupuesto de 217,6 millones. Incrementar el presupuesto más allá de este valor no representa un incremento en la función objetivo, llegando a un tope.

Luego se encuentra el estudio realizado en Estados Unidos por *Lamsal et al. (2016)* [4] sobre la cosecha de tres cultivos (caña y remolacha de azúcar, y otros vegetales) que presentan dos cualidades principales, existen múltiples productores independientes que llevan su cosecha a la misma planta, y más relevante para el problema del vino, no existe inventario relevante en la granja debido a que es poco práctico o bien imposible por distintas razones, por lo tanto la logística está planeada para un periodo de 24 horas donde el objetivo es mover las cosechas desde la granja a la planta, conociendo los tiempos de viaje, carga y descarga de los camiones. Como la planta debe satisfacer la demanda de todos los productores teniendo cierta capacidad límite, y por supuesto ninguna desea modificar su cantidad de cosecha, se establece como variable la hora de comienzo de ésta en cada planta.

Se separa el día en bloques o períodos fijos de tiempo y se penaliza en la función objetivo el exceso sobre la capacidad de la planta dentro de un período específico. Además, tomando en cuenta los tiempos en ir y volver de los camiones, se considera que si una carga esta lista para ser enviada pero no hay ningún camión disponible, el número de camiones debe ser aumentado, buscando entonces determinar la cantidad óptima de camiones. Este podría ser también un factor aplicable para considerar en el problema del vino, pensando en la cosecha simultánea de varios sectores del campo, considerando también su cercanía a la bodega y su

capacidad de procesamiento.

Se creó un conjunto de problemas de prueba a partir de información pública sobre casi 500 granjas y 11 plantas en Louisiana. Se demuestra que solamente controlar el tiempo de partida de la cosecha en cada granja puede llegar a reducir considerablemente el número de camiones necesarios. Además se estudia el impacto en la calidad de la solución al reducir el tamaño de cada período de tiempo, haciendo pruebas para 60, 30 y 15 minutos, dividiendo el día en 13, 26 y 52 períodos respectivamente y se encuentra que las soluciones obtenidas con intervalos más pequeños distribuye mejor los tiempos de llegada de cada cargamento, reduciendo la cantidad necesaria de camiones. Este resultado es consistente incluso cuando para intervalos más pequeños, algunas pruebas no encontraron todas las soluciones posibles después de 50 minutos.

El panorama de la cosecha de caña de azúcar en Brasil es analizado en *Jena et al. (2013)* [7], considerando la temporada completa dentro del modelo, la cual dura aproximadamente 7 meses. Para lograr esto el problema se divide en dos etapas, el planeamiento táctico (PT) y el planeamiento operacional (PO), donde el PT se encarga de visualizar la temporada completa, sugiriendo decisiones a nivel semanal. Luego el PO hace subdivisiones de entre 15 a 30 días y toma decisiones diarias, recibiendo como input las decisiones del PT.

Dentro de las decisiones que se deben tomar se incluye la asignación de sectores a cosechar a los equipos de trabajo (tanto mecánicos como manuales), además de los equipos de transporte que llevan la cosecha en camiones al molino donde cada camión tiene una capacidad, velocidad y costo de transporte y a cada sector se le asigna un sólo equipo de transporte que se encarga de toda su cosecha. Por su parte cada sector está asignado a lo más a un molino y estos no pueden interrumpir su trabajo, además de que deben recibir una cantidad mínima de producto con la cual generan su propia electricidad.

Cada plan determina para su medida de tiempo (PT en semanas y PO en días), los sectores que serán cosechados junto con su equipo encargado, y el molino al cual será enviada su cosecha, pero cada plan realiza algunas tareas exclusivas, por ejemplo sólo PT se encarga de asignar los equipos de transporte, en cambio PT y PO designan ambos a los grupos de trabajo en sus sectores, pero sólo PO se preocupa de la secuencia/ruta que toman los equipos. Así,

PT establece un orden general a la temporada completa, y luego PO define mayor detalle con información actualizada (a la fecha) del estado del cultivo. Otra característica relevante es que la cosecha debe ser realizada dentro del plazo elegible de cada sector, según su madurez, y luego debe enviarse a procesar el mismo día.

Ejecutando el modelo se encontró que el PT puede resolverse con un modelo de enteros tradicional, pero el PO es más difícil de resolver y CPLEX no fue capaz de encontrar soluciones viables por lo que se estudiaron variadas heurísticas como por ejemplo elegir el siguiente sector a trabajar según su relación calidad/tiempo que demora en ser cosechado (considerando movilización y trabajo). Se proveen 25 instancias de PO las cuales corresponden a distintas fechas dentro de la temporada (PT) y contienen entre 19 y 334 sectores, 1 o 2 molinos, entre 5 y 21 equipos de trabajo y un horizonte de planeamiento de hasta 16 días.

Son interesantes también las consideraciones de *Anjom et al. (2018)* [8] sobre un cultivo de frutillas en California, donde su foco son los principales factores que afectan la productividad de los trabajadores, medida en la rapidez con la que llenan una carretilla. En base a un estudio preliminar, estos se identifican como: 1) La cantidad de fruta producida por la plantación, ya que a menor cantidad tienen que caminar más recolectando fruta de más plantas para lograr llenar la carretilla. 2) La distancia entre plantas debido a su tamaño, dependiendo del método de cultivo. 3) La hora del día, separando en turnos de mañana y tarde al considerar que los trabajadores en la tarde están más cansados y además hace más calor, haciéndolos trabajar más lento. 3) Velocidad/habilidad de cosecha del propio trabajador, separado en rápido y lento. 4) Tipo de carretilla, incorporado con la introducción de carretillas que monitorean a tiempo real datos como su ubicación y el peso de fruta que cargan, pero al ser aún experimentales estas carretillas, son más grandes y pesadas que las tradicionales.

En el trabajo de *He et al. (2018)* [9] se busca optimizar el tiempo de cosecha de campos de arroz en China, considerando sectores que deben ser cosechados con máquinas específicas dependiendo de la superficie, para lo cual modelan un vehicle routing problem (VRP) para recorrer eficientemente los sectores.

Si bien para la mayoría de estos productos se requiere procesar la cosecha el mismo día que se extrae, no parecen haber mayores complicaciones para calcular el día en que esto se realizará, teniendo ventanas de varios días para cosechar el fruto en su mejor nivel de madurez. Sin embargo, como se expone a continuación, la uva presenta una sensibilidad mucho mayor en cuanto al día en que se cosecha, priorizando la cosecha dentro de su día óptimo o cercano a éste. Esto ya que su periodo de máxima madurez es muy corto y su calidad decae rápidamente con el paso de los días, afectando fuertemente el vino resultante. Este hecho agrega una particular restricción que hace al problema considerablemente más difícil de resolver, teniendo en cuenta que además se pretende optimizar los mismos factores de los cuales tratan los estudios anteriormente descritos.

A continuación se presentan 4 artículos enfocados en viñedos y que por lo tanto comparten gran parte de la estructura del problema que se resuelve en este trabajo.

Un estudio particularmente acotado al problema es el de *Ferrer et al. (2008)* [1] donde se presenta un modelo mixed integer programming (MIP) para resolver este problema, analizando ciertos aspectos adicionales. Además de la contratación de personal, se consideró el costo de mover las operaciones de un sector a otro del campo, pensando en el transporte de maquinaria y otros equipos necesarios, buscando optimizar la ruta que se realiza para recorrer cosechando los distintos sectores de la viña.

En cuanto al modelo, se realizan consideraciones como combinar ambos objetivos en una sola función, evitando trabajar en el ámbito de múltiples objetivos. La principal variable de decisión es determinar el volumen de uvas (en kg) cosechadas de un sector específico en un mismo día. La cosecha puede ser realizada de forma manual o haciendo uso de maquinaria, determinando la cantidad de cada método por separado. Además, se considera la ruta a realizar de un sector a otro, modelándolo como un problema del vendedor viajero (TSP). Esto ya que los costos de transporte pueden llegar a ser significativos cuando se tiene que mover la maquinaria y los equipos de trabajo a través del campo, que puede tener cientos de hectáreas, así, puede ser razonable cosechar algunos sectores en desfase de la fecha óptima para ajustar la ruta, siempre que esto no conlleve una pérdida de calidad significativa.

El caso base estudiado cuenta con 6163 restricciones y 2452 variables (1415 binarias), y el

problema fue resuelto en 15 minutos usando Cplex , generando una carta Gantt del itinerario que indica el volumen a cosechar de cada sector, cada día y el método usado. Esto ayuda al administrador a estimar el uso de mano de obra, anticipando situaciones en que se deba contratar personal adicional.

El caso real, que estudia un viñedo en la zona central de Chile, considera 40 sectores, un período de cosecha de 17 días y 2 bodegas fue resuelto en aproximadamente 30 segundos utilizando una heurística simple donde se subordina la ruta al calendario de cosecha previamente establecido, ya que la primera no afecta directamente las ganancias, es decir, primero se genera el itinerario y sólo una vez que está listo se toma el subconjunto de sectores a cosechar cada día y se genera una ruta TSP para cada uno. Al realizar una prueba en que se pronostica lluvia para el día 3, el resultado fue que durante los primeros días se acumula gran parte del trabajo, aumentando el costo de contratación de personal en un 76 %. Esto es especialmente significativo ya que este costo representa el 98 % del total. También se encontró que cuando no se considera la optimización de la ruta, el costo total aumenta en un 20 %. El modelo tiende a favorecer la distribución de la fuerza de trabajo, reduciendo el personal adicional en un 60 % con respecto al plan original del caso real estudiado, contribuyendo a la estabilidad de empleos. Finalmente, se reduce en un 86,7 % la penalización de calidad de la uva y un 16 % de reducción en costos de mano de obra.

Otro estudio similar es el de *Bohle et al. (2010)* [2] que utiliza una metodología de optimización robusta como una manera de lidiar con algunas de las posibles incertidumbres del problema. Se le llama robusta si la solución es poco sensible a perturbaciones en los datos, siendo factible para diversos escenarios y por consiguiente, no necesariamente óptimo para ninguno. Entre las posibles incertidumbres se encuentra la productividad de la mano de obra, que puede verse afectada por diversos motivos, como la geografía del sector en el cual se encuentran, o bien por factores climáticos, en los cuales se centra el artículo.

Para esto, se hace uso de un parámetro llamado nivel o presupuesto de incertidumbre, que modela el nivel de variación de los datos. Para el caso de prueba se realizan estudios utilizando una variabilidad de 5 %, 10 %, 20 % y 30 %, obteniendo soluciones robustas y cercanas al óptimo dentro de 2 minutos, sin aumentar considerablemente el tiempo de procesamiento

respecto de soluciones tradicionales.

Luego se encuentra el estudio de *Arnaout, Maatouk (2010)* [6], basado en el planteamiento de *Ferrer et al. (2008)* [1] adaptando su modelo de enteros (MIP), y obteniendo sus datos de un viñedo en el Líbano compuesto por 13 sectores, un máximo de 150 trabajadores para contratar, y una bodega capaz de procesar 20.000 [kg] de uva al día. Entre las nuevas consideraciones que agregar al modelo de [1] se encuentra el supuesto de que todos los sectores en que se cultiva la misma cepa de uva son adyacentes y tienen el mismo día óptimo de cosecha, por lo cual se introduce el concepto de bloque representando este conjunto completo y trabajando el modelo a partir de este en vez de por sector. Cada bloque tiene diferentes velocidades de cosecha dependiendo del terreno y su ubicación.

Además, el modelo asigna a cada bloque un día de comienzo de su cosecha, indicando que este debe ser trabajado y completado dentro de los días subsiguientes, prohibiendo días inactivos una vez que se ha comenzado el trabajo para dicho bloque, hasta que sea finalizado. Debido a este procedimiento, se vuelve crucial determinar qué bloques se asignarán primero a cada día, ya que estos recibirán prioridad de los limitados recursos disponibles tales como la capacidad de procesamiento del producto y la disponibilidad de los trabajadores para dicho día. En base a esto se estudiaron dos heurísticas, la primera (FQB) intenta asignar el inicio del trabajo de cada bloque a su día óptimo de cosecha, y luego se establecen días de trabajo extra en los días cercanos (antes o después) hasta cosecharlo todo. La segunda heurística (LBF) asigna primero los bloques más grandes, es decir, los que tomarán más días en cosechar.

Se realizaron pruebas con la instancia real, además de dos instancias fabricadas con 26 y 52 bloques, y capacidad de procesamiento de 25.000 [kg] y 45.000 [kg] respectivamente, ejecutando el modelo de enteros para cada una y también un Branch and Bound (algoritmo de búsqueda completa) por una hora. En los tres casos LBF presentó resultados considerablemente mejores que FQB y B&B, obteniendo además, con respecto a los resultados reales del viñedo, una mejora de 58 % en las ganancias, y un 11.8 % de reducción de costos de trabajo.

Una perspectiva diferente se le entrega al problema en el artículo de *Mesabbah et al. (2016)*

[5], donde se introduce la importancia del nivel de experiencia del trabajador, considerando que está directamente relacionada con su productividad, y en consecuencia con el costo de las operaciones. La experiencia de un trabajador es medida según la cantidad de días trabajados para el viñedo junto con una curva de aprendizaje. Intuitivamente, el administrador del viñedo preferirá contratar a los mismos trabajadores en todos los días en que sean requeridos para reducir esfuerzos de capacitación y aprovechar su experiencia ganada. Sin embargo, la existencia de muchos viñedos que se cosechan en la misma época del año en una misma región - como se plantea que ocurre en Egipto y de la misma forma ocurre en Chile - genera una alta competencia para la contratación de personal, causando inevitablemente posibles inconsistencias en la disponibilidad de personal día a día. A partir de esto su objetivo es resolver la siguiente pregunta, ¿es económicamente conveniente ofrecer salarios más altos para asegurar la contratación de trabajadores más eficientes? y en base a esta respuesta proponer una nueva política de reclutamiento.

El caso estudiado se encuentra en la empresa Ragab Farms en Egipto, contemplando un viñedo de aproximadamente 39.5 hectáreas que contienen 343 toneladas de uva, cosechadas dentro de un periodo de 28 días.

Aplicando esta curva de aprendizaje/productividad a los trabajadores, se investiga la viabilidad de aumentar los costos de contratación para cada uno en un 25 %, 50 %, 75 % y 100 % del costo base, con la intención de asegurar la contratación de personal experimentado. Aplicando un modelo híbrido que integra simulación de eventos discretos (DES) y modelaje basado en agentes (ABM) se concluye que es rentable pagar hasta un 75 % más, priorizando experiencia por sobre costos.

En resumen, los estudios de planificación del proceso de cosecha abarcan las consideraciones listadas en la **Tabla 2.1**, que suelen ser relevantes para resolver el problema. Dichas consideraciones se explican a continuación:

1. **No existe inventario (NI).** El producto debe ser procesado el mismo día que se extrae el fruto debido a que se deteriora rápidamente una vez extraído, por lo que debe también considerarse que los molinos/lagares tengan suficiente capacidad para procesar todo el producto cosechado en dicho día. Esta es una cualidad particularmente importante de la uva.
2. **Penalización de calidad según la fecha óptima de cosecha (PC).** Otra de las cualidades más significativas de la uva por sobre otros frutos es la fuerte necesidad de extraerla en el día preciso ya que pequeños cambios en su madurez influyen notoriamente en la calidad del vino resultante. Esto no ocurre en tal magnitud para otras cosechas y es por esto que es una de las penalizaciones básicas del problema presentado.
3. **Contratación de personal (CP).** En línea con la consideración anterior. El personal que trabaja todo el año en la plantación/viña no da abasto para cosechar todo el producto considerando terrenos de varias hectáreas, por lo tanto es necesario contratar personal adicional, particularmente si se requiere cumplir con una fecha determinada para extraer el producto como sucede en el punto anterior. Así, esto implica calcular cuanta gente es necesario contratar, lo cual tiene un costo asociado.
4. **Productividad variable (PV).** Llevando el acercamiento un paso más cerca de la realidad, la productividad del trabajo puede variar por diversas razones desde la experiencia del personal, la geografía del terreno como su inclinación, el horario del día o las condiciones climáticas, entre otros.
5. **Movilización de las operaciones (ruta y costos) (MO).** Debido a que cada sector puede abarcar varias hectáreas, existe un costo de tiempo y/o monetario asociado a transportar al personal y la maquinaria de un sector a otro, particularmente si se desea que trabajen en más de un sector al día.
6. **Efectos climáticos (EC).** El clima es un factor aleatorio que juega un papel importante en cualquier proceso de cosecha. Por ejemplo, si llueve esto podría afectar el proceso de maduración del fruto, o bien algunas máquinas podrían no ser capaces de trabajar ese día, interrumpiendo el proceso completo.

7. **Variedad de cultivos (VC).** Puede ser relevante también si se debe cosechar múltiples variedades o cepas del fruto, ya que implica posiblemente distintos precios (ganancia asociada por Kg de producto), puede también determinar los tipos de cosecha viables (manual, mecánico, mixto), y puede afectar el orden en que se cosechan los sectores debido a ciertas restricciones (e.g. sólo se puede procesar una variedad a la vez)
8. **Transporte de la cosecha a la bodega (TC).** Suele considerarse un equipo dedicado a esta tarea llevando el producto en camiones, lo cual implica nuevamente un costo, además de una capacidad límite de transporte.
9. **Presupuesto como limitante (PL).** Pensando que los recursos financieros son limitados y que se debe contar de antemano con el presupuesto para contrataciones y uso de maquinaria, nacen restricciones como limitar la cantidad de contrataciones a un cierto número y buscar la mejor solución posible dentro de ese rango, o bien puede ser interesante generar una serie de soluciones diferentes y analizar el comportamiento de los costos dependiendo de la calidad de la solución y así tener una referencia para futuros procesos.
10. **Desglose del día en periodos o turnos (DT).** Parece natural pensar en el día como un conjunto de turnos (e.g. mañana y tarde) en los que pueden realizarse tareas diferentes, sin embargo es una consideración poco utilizada en los trabajos existentes debido a que hace el problema computacionalmente mucho más difícil de resolver al aumentar las posibilidades de cada asignación. Sin embargo esto también da lugar a una amplia gama de posibilidades para la solución final, acercándose aún más a la realidad al permitir tomar decisiones más específicas.

También es importante tomar en cuenta el tamaño de las instancias que utilizó cada investigación como referencia, ya que características como el intervalo de tiempo a planificar (en días) o el número de sectores, afecta directamente al costo computacional del algoritmo.

En la **Tabla 2.1** se condensan las características de cada investigación, junto con las características que serán relevantes en el estudio expuesto en este trabajo.

Estudio	Cultivo	Días	Sectores	Bodegas	Trabajo	Consideraciones														
						NI	PC	CP	PV	MO	EC	VC	TC	PL	DT					
<i>Ferrer et al. (2008)</i> [1]	Uvas	17	40	2	Mixto	X	X	X	X	X	X	X	X							
<i>Bohle et al. (2010)</i> [2]	Uvas	18	20	2	Mixto	X	X	X	X	X	X									
<i>Mesabbah et al. (2016)</i> [5]	Uvas	28	13	1	Manual	X	X	X	X											X
<i>Arnaout, Maatouk (2010)</i> [6]	Uvas	n/e	13	1	n/e	X	X		X											X
<i>Herrera et al. (2017)</i> [3]	Aceitunas	15	10	1	Mecánico	X														X
<i>Lamsal et al. (2016)</i> [4]	Azúcar	1	55	1	n/e	X														X
<i>Jena et al. (2013)</i> [7]	Azúcar	16	19	1	Mixto	X								X						X
<i>Anjom et al. (2018)</i> [8]	Frutillas	n/e	n/e	n/e	Manual				X					X						X
<i>He et al. (2018)</i> [9]	Arroz	n/e	30	n/e	Mecánico				X					X						X
<b>Modelo propuesto</b>	<b>Uvas</b>	<b>13-17</b>	<b>20-40</b>	<b>2</b>	<b>Mixto</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>

Tabla 2.1: Resumen de las características de cada investigación. n/e: no especificado.

Este trabajo enfocará el problema considerando NI, PC, CP, MO, VC y DT, donde los 3 primeros son esenciales para el estudio de la uva, y el último es particularmente interesante ya que no se encontró documentación sobre estudios de uva que hayan desglosado el día en periodos.

# Capítulo 3

## Propuesta e Implementación

### 3.1. Descripción del algoritmo

Para resolver el problema se utiliza el algoritmo GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search). Este consiste en la realización iterativa de construcciones de tipo Greedy (Codicioso) que luego son mejoradas a través de búsqueda local. Este proceso continúa hasta llegar a alguna condición de parada (tiempo, calidad, iteraciones, etc). La idea es construir diversas soluciones iniciales que exploren distintos puntos del espacio de búsqueda del problema para luego explotar cada una de esas soluciones con un algoritmo de búsqueda local. El pseudocódigo de GRASP se observa en el **Algoritmo 3.1**.

GRASP fue originalmente propuesto en *Feo et al. (1989)* [10], y desde entonces ha sido ampliamente utilizado en estudios como *Rajkumar et al. (2011)* [11] para resolver el problema Job-Shop, y el problema Set-Covering en *Bautista, Pereira (2017)* [12].

Además, el algoritmo de búsqueda local a utilizar en GRASP puede seleccionarse de entre distintas posibilidades. En este trabajo se utiliza Hill Climbing, el cual consiste en mejorar la solución a través de pequeños cambios llamados movimientos. Idealmente, se definen varios movimientos que modifican de forma distinta la solución, en un proceso iterativo por mejorar poco a poco el resultado hasta que ningún posible movimiento obtendría una mejora. El proceso se expresa en el **Algoritmo 3.2**.

---

```
1 GRASP():
2   Best = 0
3   while (no se cumpla la condicion de parada):
4     Sol ← construccion Greedy
5     Sol ← BusquedaLocal(Sol)
6     if calidad(Sol) > Best:
7       SolBest ← Sol
8       Best ← calidad(Sol)
9   return SolBest
```

---

Algoritmo 3.1: Pseudocódigo del algoritmo GRASP.

---

```
1 Hill Climbing(Sol):
2   SolBest ← Sol
3   Movimientos ← lista de posibles modificaciones
4   while (continuar):
5     for each movimiento in Movimientos:
6       SolActual ← aplicarMovimiento(Sol, movimiento)
7       if calidad(SolActual) > calidad(SolBest):
8         SolBest ← SolActual
9         Sol ← SolActual
10    break
11  if solucion no mejoro:
12    continuar ← false
13  return SolBest
```

---

Algoritmo 3.2: Pseudocódigo del algoritmo Hill Climbing.

### 3.1.1. GRASP y Hill Climbing

El método utilizado para buscar nuevas soluciones es llamado GRASP (ver **Figura 3.1**). El método GRASP consiste en realizar iterativamente la construcción de una solución inicial

(**Paso 2**) e intentar mejorarla a través del proceso de búsqueda local llamado Hill Climbing con primera mejora (**Paso 3**). Este proceso de construcción y mejora se repite hasta llegar a una condición de parada que puede ser una cantidad específica de tiempo o de iteraciones, una cierta calidad umbral de la solución, entre otras. En este caso se utilizará una cantidad de tiempo de ejecución, por ejemplo seguir buscando hasta cumplir cinco minutos y entregar la mejor solución encontrada hasta ese momento.

Hill Climbing (**Paso 3**) por su parte consiste en tomar la construcción inicial (**Paso 2**), la cual es una solución viable al problema pero no necesariamente la mejor, y aplicarle uno (o más) de los movimientos en orden (**Paso 4**) que se describirán en detalle en la siguiente sección, pero que por ahora se entienden como pequeñas modificaciones para probar si la calidad de la solución aumenta. Si la aplicación de los movimientos produce mejoras repite este proceso nuevamente desde el primer movimiento, es decir, vuelve al **Paso 4**. Este proceso continúa hasta llegar a una solución que no pueda ser mejorada con ninguno de los movimientos. Al llegar a este punto Hill Climbing termina y guarda la mejor solución encontrada (**Paso 5**). Luego GRASP guarda esta solución y si queda tiempo de ejecución se repite el proceso completo (vuelve al **Paso 1**), donde se obtiene una nueva solución, y GRASP esta vez revisa si es mejor que la encontrada anteriormente, de serlo se guarda (**Paso 6**) y si no se descarta (**Paso 7**), en cuyo punto se revisa nuevamente el tiempo restante hasta completar el tiempo de ejecución.

### 3.1.2. Representación

La solución se representa a través de la siguiente matriz:

$$sol_{stdp} = a \tag{3.1}$$

Donde **s** representa el sector cosechado, **t** el tipo de trabajador (fijo o variable) o vendimiadora usada, **l** es el lugar al que se envía, **d** es el día en que se realiza y **p** es el período específico dentro de dicho día. Por lo tanto si  $sol_{stdp} > 0$  entonces **a** es la cantidad de producto cosechado para dichas especificaciones.

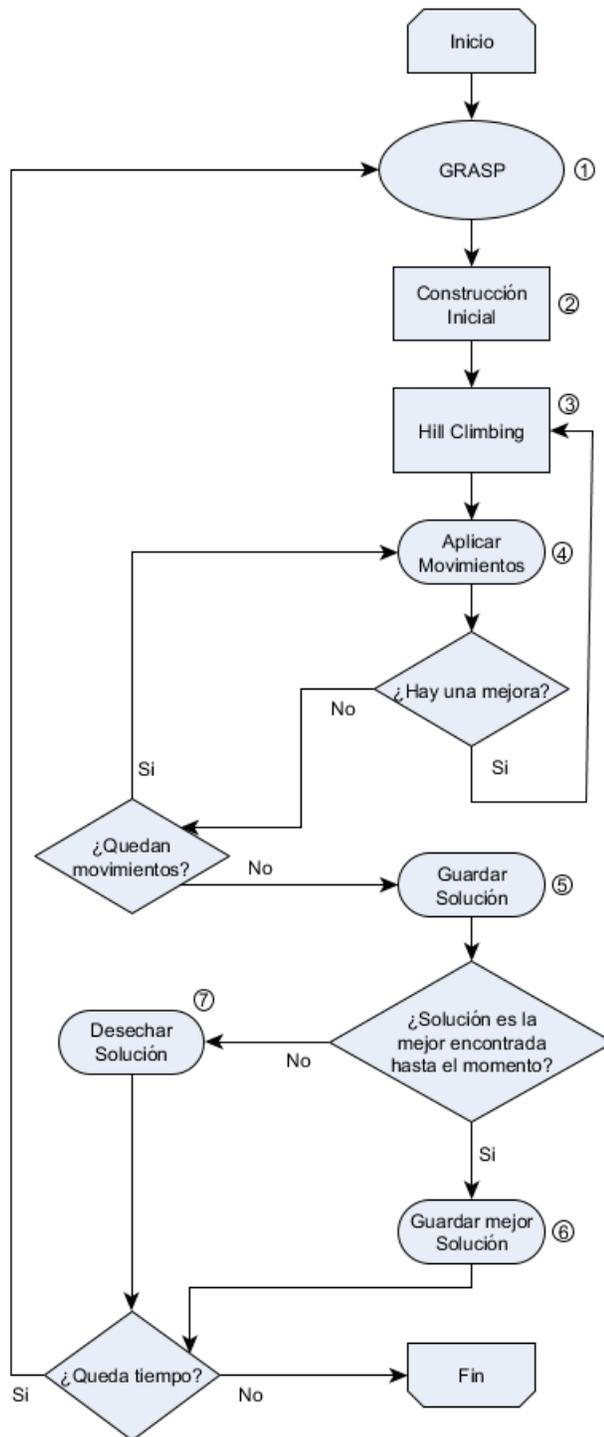


Figura 3.1: Esquema lógico del procedimiento GRASP propuesto.

### 3.1.3. Construcción inicial

El proceso de construcción inicial desarrollado en este trabajo tiene como objetivo producir una solución inicial viable y de la mejor calidad posible, sin tomar en cuenta los costos. Para esto, se comienza con la matriz de la **Ecuación 3.1** con todos sus campos igual a cero, a la que se le va agregando iterativamente la asignación de cosecha, de cantidad (en kg) equivalente a la productividad por hora del trabajador/máquina al que se asigna multiplicado por la cantidad de horas que contiene un periodo, es decir:

$$sol_{stdp}+ = Productividad(T_1) \cdot nHP \quad (3.2)$$

Dentro de este proceso se implementaron variadas heurísticas respecto a la asignación del trabajo. Por ejemplo, la variabilidad de las distintas construcciones iniciales para explorar nuevas posibilidades. También toma un rol importante el orden de asignación entre los distintos tipos de trabajo, y el día para el cual se esta intentando asignar.

1. Dado que el proceso de construcción se realizará repetidas veces, se espera que cada nueva construcción sea distinta a la anterior para así explorar una mayor diversidad dentro de las posibles soluciones encontradas. Para esto, las listas de sectores y lagares son recorridas en desorden de forma aleatoria, de modo que no se de preferencia a la cosecha de ningún sector, ni tampoco a la sobrecarga de un lagar en específico, ya que inevitablemente los sectores que se asignan primero tendrán acceso prioritario a los limitados recursos.
2. Las máquinas vendimiadoras son asignadas primero a los sectores que requieren su uso exclusivo, y luego las máquinas que sobran se asignan a los sectores de trabajo mixto (máquinas y trabajadores). De esta forma se asegura la cosecha de dichos sectores exclusivos y el uso máximo de las máquinas vendimiadoras ya que son mucho más costo/eficientes que el trabajo manual..
3. Luego se asignan los trabajadores fijos hasta que queden todos asignados.
4. Por último se comienza la contratación de los trabajadores adicionales que sean necesarios para cubrir la cosecha que falta. Esto nuevamente para asegurar el uso de los

trabajadores fijos, que ya han sido contratados.

5. Además, con tal de producir una construcción inicial que prioriza la mejor calidad posible, todas las asignaciones anteriormente mencionadas se realizan directamente en el día óptimo de cada sector siempre que sea posible. Esto puede no ser posible debido a que el trabajador/máquina que se intenta asignar ya está ocupado/a para ese día, o bien el lugar al que se intenta asignar ya se encuentra con su máxima capacidad para ese día. De darse uno de estos casos, se intenta asignar en los días más cercanos, es decir, se revisa el día anterior al óptimo, y si este tampoco es viable entonces se prueba con el día siguiente. Así, se continúa rodeando el día óptimo hasta encontrar uno viable o haber revisado todos los días factibles para la cosecha de dicho sector.
6. En caso de que se revisen todos los días factibles de un sector sin poder cosecharlo en su totalidad, la construcción se considera inviable y se vuelve a comenzar el proceso con un nuevo orden aleatorio de asignación de los recursos.

El proceso completo puede expresarse como se muestra en el **Algoritmo 3.3**. Con tal de seguir las heurísticas recién mencionadas, notar que el orden de los sectores y lugares se elige aleatoriamente, pero no así el de días, periodos y trabajadores. Los días se eligen por su cercanía al óptimo del sector. Los periodos son el orden para promover el trabajo continuo durante el día. El tipo de trabajo también va en orden predeterminado, con las máquinas vendimiadoras primero, luego la cosecha manual, con los trabajadores fijos y luego los contratados.

#### **3.1.4. Movimientos**

Un movimiento consiste en una modificación (por lo general pequeña) de la solución para ver si esto produce una mejora en su calidad actual. En el acercamiento propuesto, los movimientos se aplican continuamente siempre que se sigan encontrando mejores soluciones. Es conveniente además disponer de distintos tipos de modificaciones para evitar sesgar la solución hacia un resultado específico y lograr obtener resultados variados con cada intento.

---

```

1 Construcción(V, T, S, L, nS, nTT, nV, nL, nD, nH, nP):
2   inicializar sol[nS][nV+nTT][nL][nD][nP] = 0
3   for q=1 to 2:
4     sectores <- lista de sectores en orden aleatorio
5     for each sector s in sectores:
6       if (q==1 and modo(s) == maquina) or (q==2 and modo(s) != maquina):
7         for j=1 to nV+nTT:
8           if tipo de trabajador es aceptado para el modo de s:
9             lagares <- lista de lagares en orden aleatorio
10            for each lagar l in lagares:
11              optimo_1 <- dia_optimo(s) # dia que avanzara desde el optimo
12              optimo_2 <- dia_optimo(s)-1 # dia que retrocedera desde el optimo
13              while optimo_1 u optimo_2 dentro del plazo viable del sector s:
14                for p=1 to nP:
15                  if optimo_1 esta dentro del plazo viable de s:
16                    while queda cosecha para s
17                      and lagar l tiene capacidad
18                      and quedan trabajadores/vendimiadoras j para el dia y periodo:
19                      # sumar a la solucion la cosecha realizada en un periodo
20                      sol[s][j][l][optimo_1][p] += Productividad(j)*nHP
21                  if optimo_2 esta dentro del plazo viable de s:
22                    while queda cosecha para s
23                      and lagar l tiene capacidad
24                      and quedan cosechadores j para el dia y periodo:
25                      # sumar a la solucion la cosecha realizada en un periodo
26                      sol[s][j][l][optimo_2][p] += Productividad(j)*nHP
27                  optimo_1 += 1
28                  optimo_2 -= 1
29   return sol

```

---

Algoritmo 3.3: Pseudocódigo del proceso constructivo inicial.

Para los movimientos propuestos, es importante aplicarlos en orden ya que forman parte de la estrategia para encontrar soluciones de calidad a partir de la construcción inicial, que recordando concentra el trabajo en los días óptimos, maximizando la calidad de la uva pero ignorando los costos asociados. Es por esto que el primer movimiento debe encargarse de repartir entre distintos días el trabajo de las contrataciones ya que es posible reducir considerablemente el costo de contrataciones. Luego el segundo movimiento intenta optimizar la solución resultante de los cambios del primer movimiento, reordenando de forma más detallada el trabajo de las contrataciones. El resto de los movimientos se encarga de evitar que la solución caiga en ciertos óptimos locales conocidos. Así, a continuación se describen los diferentes movimientos propuestos para resolver este problema.

### **Primer movimiento**

La solución entregada por la construcción inicial está claramente inclinada hacia la calidad de la uva, tendiendo a asignar muchos trabajadores para un mismo día/periodo óptimo, es por esto que el primer movimiento le da prioridad a la reducción del personal contratado, disminuyendo los costos operacionales.

Este movimiento intenta cambiar de día/periodo el trabajo del personal variable, con tal de reducir la cantidad máxima de personal en cualquiera, repartiéndolos de manera más homogénea y haciendo posible reducir el número de contrataciones.

El proceso consiste en buscar el día/periodo en que se requieren más contrataciones y comenzar a cambiar cosecha a otro día/periodo (nuevamente en cantidades equivalentes a la productividad del trabajador en un periodo) hasta que se logra reducir el número de contrataciones. En este punto se recalcula el día/periodo de más trabajo y se repite el proceso.

En el caso de que múltiples días/periodos tengan la máxima cantidad de contrataciones, se intenta mover la cosecha de todos al mismo tiempo, encontrando uno nuevo para cada uno antes de realizar el cambio de forma definitiva. De no encontrarse una configuración que reduzca las contrataciones de todos estos días a la vez, se descartan los cambios y se prueba con el próximo movimiento en la lista.

También es importante mencionar que siempre se debe respetar las restricciones del problema, descritas en el **Capítulo 3**, es decir, respetar el plazo de cosecha de cada sector sin posibilidad de trabajarlo fuera de este, y el lagar debe tener capacidad disponible suficiente para la nueva configuración. El pseudocódigo del movimiento se expresa en el **Algoritmo 3.4**.

---

```
1 Movimiento_1(sol) :
2   periodos <- buscar el(los) periodo(s) con mas contrataciones asignadas
3   periodos <- ordenar aleatoriamente la lista
4   for each periodo p1 in periodos:
5     sectores <- lista de sectores en orden aleatorio
6     for each sector s in sectores:
7       lagares <- lista de lagares en orden aleatorio
8       for each lagar l in lagares:
9         dias <- lista de dias en orden aleatorio
10        for each dia d in dias:
11          periodos2 <- lista de periodos en orden aleatorio
12          for each periodo p2 in periodos2:
13            sol <- intercambiar un trabajador variable desde periodo p1 a p2
14            if sol es viable:
15              if no quedan periodos p1 por recorrer y sol ha mejorado:
16                return sol
17              else if quedan periodos p1 por recorrer:
18                conservar cambios en sol y pasar al siguiente periodo p1
19              else:
20                desechar cambios
21 return sol
```

---

Algoritmo 3.4: Pseudocódigo del primer movimiento.

## Segundo movimiento

Con el segundo movimiento, se maneja nuevamente el personal variable, revisando esta vez todo el rango de tiempo de cosecha, a diferencia del primero donde sólo es de interés el día/periodo más ocupado. Su objetivo es intentar mover al personal variable a un día/periodo más cercano al óptimo, aumentando las ganancias y a la vez revisando que esto no implique un aumento en las contrataciones y por tanto en el costo operacional. Este movimiento nace para rectificar y optimizar los resultados del primer movimiento, ya que como se dijo este maneja muchas elecciones aleatorias.

El proceso en sí es similar al anterior, pero varía el espacio recorrido, siendo el espectro completo de la solución actual. Este se muestra en el **Algoritmo 3.5**.

---

```
1 Movimiento_2(sol):
2   dias1 <- lista de dias en orden aleatorio
3   for each dia d1 in dias1:
4     periodos1 <- lista de periodos en orden aleatorio
5     for each periodo p1 in periodos1:
6       sectores <- lista de sectores en orden aleatorio
7       for each sector s in sectores:
8         lagares <- lista de lagares en orden aleatorio
9         for each lagar l in lagares:
10          dias2 <- lista de dias en orden aleatorio
11          for each dia d2 in dias2:
12            periodos2 <- lista de periodos en orden aleatorio
13            for each periodo p2 in periodos2:
14              sol <- intercambiar un trabajador variable desde periodo p1 a p2
15              if sol es viable y ha mejorado:
16                return sol
17            else:
18              desechar cambios
19  return sol
```

---

Algoritmo 3.5: Pseudocódigo del segundo movimiento.

### **Tercer movimiento**

Los trabajadores fijos (o full time) no dependen de las contrataciones, sino que siempre están disponibles ya que trabajan regularmente en la viña, es por esto que la construcción los intenta asignar a todos, todos los días. Esto ayuda a aprovechar mejor este recurso, sin embargo hay ocasiones en que es más conveniente darles tiempo libre y reemplazarlos por contrataciones adicionales, particularmente cuando esto significa un aumento de ganancia significativo (cosechar más cerca del día óptimo) que supera su costo, por lo que surge la necesidad de un movimiento que realice este intercambio.

El movimiento consiste en reemplazar la cosecha de un trabajador fijo por el equivalente de cosecha en trabajadores variables, asignándolo en cualquier día/periodo dentro del mismo sector, y comprobando si genera una mejora en la utilidad de la solución. Esto se traduce a pseudocódigo en el **Algoritmo 3.6**.

### **Cuarto movimiento**

A medida que se aplica el **tercer movimiento**, van quedando trabajadores fijos disponibles para asignar en cualquier sector, por lo que este movimiento intenta reasignarlos en reemplazo a los trabajadores variables.

El pseudocódigo del **Algoritmo 3.7** comparte el mismo espacio de búsqueda que el movimiento anterior y sólo se invierten los trabajadores a intercambiar.

### **Quinto movimiento**

La construcción también intenta aprovechar al máximo las máquinas vendimiadoras, asignándolas antes que los trabajadores ya que son más costo/eficientes que el trabajo manual, sin embargo siguiendo la misma línea del **tercer movimiento**, puede ocurrir que sea más conveniente utilizar el trabajo manual en ciertos días/periodos para un mismo sector. Este movimiento entonces reemplaza el trabajo de una máquina vendimiadora en un día, periodo y lagar específicos por su equivalente de cosecha en trabajadores variables.

Notar que no se intenta reemplazar las máquinas por trabajadores fijos, ya que esto ocurre utilizando el **cuarto movimiento** después de este.

Nuevamente, el procedimiento del **Algoritmo 3.8** es muy similar a los dos movimientos anteriores y la única diferencia se encuentra en el intercambio realizado.

---

```
1 Movimiento_3(sol):
2   sectores ← lista de sectores en orden aleatorio
3   for each sector s in sectores:
4     dias1 ← lista de dias en orden aleatorio
5     for each dia d1 in dias1:
6       periodos1 ← lista de periodos en orden aleatorio
7       for each periodo p1 in periodos1:
8         lagares1 ← lista de lagares en orden aleatorio
9         for each lagar l1 in lagares1:
10          dias2 ← lista de dias en orden aleatorio
11          for each dia d2 in dias2:
12            periodos2 ← lista de periodos en orden aleatorio
13            for each periodo p2 in periodos2:
14              lagares2 ← lista de lagares en orden aleatorio
15              for each lagar l2 in lagares2:
16                sol ← quitar cosecha de un trabajador fijo en d1,p1,l1 y
17                  agregar su equivalente en trabajadores variables en d2,p2,l2
18                if sol es viable y ha mejorado:
19                  return sol
20                else:
21                  desechar cambios
22 return sol
```

---

Algoritmo 3.6: Pseudocódigo del tercer movimiento.

---

```

1 Movimiento_4(sol):
2   sectores ← lista de sectores en orden aleatorio
3   for each sector s in sectores:
4     dias1 ← lista de dias en orden aleatorio
5     for each dia d1 in dias1:
6       periodos1 ← lista de periodos en orden aleatorio
7       for each periodo p1 in periodos1:
8         lagares1 ← lista de lagares en orden aleatorio
9         for each lagar l1 in lagares1:
10          dias2 ← lista de dias en orden aleatorio
11          for each dia d2 in dias2:
12            periodos2 ← lista de periodos en orden aleatorio
13            for each periodo p2 in periodos2:
14              lagares2 ← lista de lagares en orden aleatorio
15              for each lagar l2 in lagares2:
16                sol ← agregar cosecha de un trabajador fijo en d2,p2,l2 y
17                  quitar su equivalente en trabajadores variables en d1,p1,l1
18                if sol es viable y ha mejorado:
19                  return sol
20                else :
21                  desechar cambios
22  return sol

```

---

Algoritmo 3.7: Pseudocódigo del cuarto movimiento.

En este capítulo se explicó en detalle el algoritmo propuesto para resolver el problema de planificación de cosecha de uvas para la producción de vino. Para esto, se comenzó por definir el algoritmo GRASP utilizado, y definir la búsqueda local asociada que en este caso es Hill Climbing.

Luego se explicó la lógica y heurísticas detrás de la creación de una construcción inicial, como también de los “movimientos”, o pequeñas modificaciones iterativas a la solución y que se implementarán en orden a cada nueva construcción.

---

```
1 Movimiento_5(sol):
2   sectores <- lista de sectores en orden aleatorio
3   for each sector s in sectores:
4     dias1 <- lista de dias en orden aleatorio
5     for each dia d1 in dias1:
6       periodos1 <- lista de periodos en orden aleatorio
7       for each periodo p1 in periodos1:
8         lagares1 <- lista de lagares en orden aleatorio
9         for each lagar l1 in lagares1:
10          dias2 <- lista de dias en orden aleatorio
11          for each dia d2 in dias2:
12            periodos2 <- lista de periodos en orden aleatorio
13            for each periodo p2 in periodos2:
14              lagares2 <- lista de lagares en orden aleatorio
15              for each lagar l2 in lagares2:
16                sol <- quitar cosecha de una vendimiadora en d1,p1,l1 y
17                  agregar su equivalente en trabajadores variables en d2,p2,l2
18                if sol es viable y ha mejorado:
19                  return sol
20                else :
21                  desechar cambios
22 return sol
```

---

Algoritmo 3.8: Pseudocódigo del quinto movimiento.

# Capítulo 4

## Experimentos y Resultados

En este capítulo se presentan los experimentos realizados durante este trabajo.

Los principales elementos a estudiar son:

- **Permanencia del personal variable:** Basado en el estudio de *Mesabbah et al. (2016)* [5], la importancia de conservar trabajadores con experiencia en la viña, facilitando confiar en que cumplirán su meta diaria y a realizar el seguimiento del calendario programado, evitando además tiempo perdido en capacitaciones extras. El método para mantener a las mismas personas contratadas trabajando todos los días que sean necesarios fue, como se explica en el **Capítulo 1**, contratarlos desde el primer día hasta el último en que sean requeridos. Por ejemplo, si se necesitan 50 contrataciones el primer día, 40 el segundo y 50 el tercero, a las 50 personas se les contrataría por los 3 días, para asegurar que las mismas del primero sean las que asistan al segundo y tercero.
- **Tasa costo/productividad de los trabajadores:** Cuando se estudiaba la relación costo/productividad de los trabajadores se notó que mientras más cercanos son estos dos valores, las decisiones de contratar un nuevo trabajador se vuelven más difíciles, ya que hay menor diferencia entre su costo y su ganancia asociada, donde la última también es influenciada por el precio del kg de uva. Siguiendo la misma línea, se nota el caso en que se debe elegir si para cosechar cierto sector es conveniente contratar personal adicional para cosechar más en un mejor día, o bien ahorrar en contrataciones y

perder cierta diferencia de ganancia por cosechar en un día peor en términos de calidad del producto. Esta decisión se vuelve más difícil de tomar cuando el costo de contratar una persona extra es similar a la pérdida asociada a la cosecha tardía o temprana de un sector.

- **Capacidad de los lagares:** Los lagares también juegan un papel importante, ya que tienen una capacidad máxima de procesamiento al día. Esto significa que la cantidad de cosecha diaria de uva tiene un límite que no puede ser sobrepasado, ya que como indica la naturaleza del problema, no es posible almacenar la uva una vez extraída. Además, aumentar la capacidad de los lagares no es una tarea fácil ya que implica la construcción de nueva infraestructura. Por lo tanto, este límite obliga a distribuir la carga de trabajo de cada día, por lo que los sectores comienzan a competir por el uso de los lagares, haciendo más difícil cosechar cerca de sus días óptimos.
- **Organización de turnos y transporte de trabajadores:** Por último, implementar la separación del día en periodos para representar de forma más realista y detallada el calendario, hace posible la asignación de máquinas y trabajadores que se mueven entre distintos sectores a lo largo del día, lo que abre espacio para nuevas posibilidades y mejoras a la solución final. Sin embargo, es importante notar que estos traslados conllevan un costo de transporte y de tiempo no despreciable ya que cada sector puede abarcar varias hectáreas. Tomando esto en cuenta, se utiliza la matriz de adyacencia “A” definida en las **Constantes** de la instancia utilizada, junto con un algoritmo Dijkstra que calcula las rutas más cortas, para finalmente obtener el costo asociado a movilizar las operaciones desde cada punto de partida y de destino.

## 4.1. Escenarios

Tomando en cuenta estas consideraciones, se confeccionaron 3 escenarios de prueba. El caso base fue diseñado a partir del estudio de *Ferrer et al. (2008)* [1] y los otros dos son variaciones del mismo.

Cada escenario a su vez será estudiado utilizando 2 y 4 periodos por día, formando un total de 6 casos que serán llamados instancias. Los escenarios contienen toda la información que requiere el programa para ejecutarse, y las características de los escenarios definidos se muestran en la **Tabla 4.1**. Sus características son: el N° de días que abarca el proceso de cosecha, el N° de sectores a cosechar, el N° de vendimiadoras y trabajadores fijos disponibles, la productividad y costo de las vendimiadoras y de los trabajadores fijos y contratados, la capacidad diaria de los lagares para procesar uva, el costo de transportar trabajadores y vendimiadoras de un sector a otro entre distintos periodos del día, la ganancia por kg de uva cosechada en su día óptimo, y la pérdida lineal diaria de ganancia por cada día de desfase con su óptimo.

Escenario		1	2	3
Días		13	13	17
Sectores		20	40	40
	Cantidad	1		
Vendimiadoras	Productividad [kg/Hr]	12.148		
	Costo [USD/Hr]	8		
	Cantidad	50	100	100
Trabajadores Fijos	Productividad [kg/Hr]	20		
	Costo [USD/Hr]	3		
Contrataciones	Productividad [kg/Hr]	10		
	Costo [USD/Hr]	2		
Lagares	Capacidad al día [kg]	130.000		
		130.000		
Transporte	Vendimiadoras [USD/km]	30		
	Trabajadores [USD/km]	15		
Uvas	Ganancia [USD/kg]	0.4378		
	Pérdida diaria [%]	0.1		

Tabla 4.1: Características de cada escenario implementado.

Notar que los nuevos escenarios creados (2 y 3) son más grandes que el primero. El escenario 2 abarca 40 sectores cosechados en 13 días, y el escenario 3 considera 40 sectores cosechados

en 17 días. Esto los hace más difíciles de resolver al aumentar las posibilidades de asignación, particularmente en el escenario 2 donde la ventana de tiempo no aumenta junto con el aumento de trabajo teniendo más sectores, lo que puede llevar a una mayor competencia entre los sectores por utilizar la limitada mano de obra disponible.

Como ejemplo, la **Tabla 4.2** muestra las características de los 20 sectores definidos para el primer escenario, donde se muestra el tipo de cosecha permitida en cada sector, la cantidad de producto disponible, el día óptimo de su cosecha, y el rango mínimo y máximo para cosechar la uva de cada sector, dentro de los 13 días de cosecha que comprende el primer escenario.

Para cada una de las instancias descritas se analizarán las mejores soluciones obtenidas por el algoritmo propuesto, comparándolas con las obtenidas por un modelo de búsqueda completa construido en el solver Gurobi. Ambos acercamientos serán ejecutados por 15 minutos, dentro de los cuales podrán obtener sus respectivas soluciones del problema. Para cada uno se muestra la mejor solución encontrada junto con los detalles de calidad, ganancias y costos, entre otros. Los 15 minutos de ejecución fueron establecidos ya que se considera un tiempo razonable de espera para obtener una nueva planificación del proceso de cosecha en caso de que, al llevar la propuesta a una situación real, la administración de un viñedo requiera en cualquier momento explorar alternativas de planificación de forma rápida.

Los experimentos fueron realizados en un notebook con un procesador Intel Core i7 7500U de 2.9 GHz y 12 Gb de RAM. Las instancias se encuentran en la carpeta input dentro del proyecto adjunto.

## **4.2. Escenario 1: 13 Días y 20 Sectores**

### **4.2.1. Instancia 1: Escenario 1 con 2 periodos al día**

Los mejores resultados obtenidos luego de 15 minutos de ejecución se muestran en la **Tabla 4.3**. En ella se muestra la utilidad total, la ganancia producto de la cosecha diaria y el valor de la uva cada día, la cantidad de personal variable que fue necesario contratar durante los 13

Sector	Cosecha	Uvas [kg]	Día óptimo	Día mínimo	Día máximo
1	Manual	40000	7	4	10
2	Manual	84860	9	5	13
3	Manual	84550	6	3	8
4	Manual	40000	4	1	7
5	Manual	40000	6	3	9
6	Manual	82280	5	2	8
7	Manual	60050	5	4	8
8	Manual	74240	10	6	13
9	Mixta	91790	6	3	7
10	Manual	43000	4	1	6
11	Manual	68632	5	2	8
12	Mixta	126287	7	5	11
13	Manual	99920	8	3	12
14	Manual	43000	10	6	13
15	Mixta	157520	11	8	13
16	Manual	57390	11	7	13
17	Mixta	125610	9	5	11
18	Manual	40000	8	6	12
19	Manual	40000	2	1	5
20	Mixta	138380	3	1	7

Tabla 4.2: Características de cada sector para el primer escenario.

días de cosecha, los costos asociados al trabajo de cada método de cosecha (vendimiadoras y trabajadores fijos y variables), y el costo de transportar trabajadores entre distintos sectores a lo largo de un mismo día.

Utilidad	Ganancia	Costo Total	Contrataciones	Desglose de Costos			
				Vendimiadoras	Fijos	Variables	Transporte
442659	631247	188587	513	421	23400	160056	4710

Tabla 4.3: Resultados generales para la planificación de la instancia 1.

Cabe mencionar que se utilizan 513 contrataciones de personal adicional, y que el algoritmo demora aproximadamente 2 minutos en encontrar cada solución, alcanzando a encontrar 8 soluciones dentro de los 15 minutos establecidos. La solución mostrada en la tabla anterior fue la que obtuvo la calidad más alta de las 8, con las demás obteniendo resultados del mismo orden de calidad pero un poco peores, y usando una distribución distinta de los recursos disponibles, es decir, distribución entre los días y sectores y distinta cantidad de contrataciones.

La **Tabla 4.4** es un ejemplo de como se ve el resultado final de la planificación de cosecha para la primera instancia. Se muestra el desglose de la cosecha diaria de cada sector, en negrita se indica el día óptimo del sector, y con números sólo los días viables para cosechar dicho sector. Además, la última fila muestra la cantidad total cosechada cada día, y la última columna muestra la cosecha total de cada sector.

Observando la **Tabla 4.4**, destaca a la vista la concentración de trabajo que se forma alrededor de los días 3 y 7 entre los sectores 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11 y 20 lo que se debe a que todos estos sectores tienen su día óptimo de cosecha entre estos días (marcados en negrita). Esto implica que dichos sectores deben competir por los recursos disponibles en esos días, razón por la cual por ejemplo la cosecha del sector 3 consiste en 6 días trabajados, del 3 al 8. Este rango coincidentemente equivale al rango viable para cosechar dicho sector (recordando la **Restricción 2: Cosechar dentro del plazo del sector**). Este hecho nos dice que el algoritmo prefiere, en este caso, repartir la cosecha entre varios días con tal de evitar el aumento de contrataciones.

Por el contrario, tenemos sectores como el 9 y 20 que se cosechan completamente en un

S/D [kg]	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	Total
S1				0	0	0	<b>37720</b>	0	2280	0				40000
S2					0	0	0	0	<b>36740</b>	12000	12000	13320	10800	84860
S3			14700	12000	12000	<b>21850</b>	12000	12000						84550
S4	5460	0	13200	<b>21040</b>	0	0	300							40000
S5			540	0	0	<b>38560</b>	300	0	600					40000
S6		0	45060	0	<b>10220</b>	10080	16920	0						82280
S7				31320	<b>26630</b>	0	2100	0						60050
S8					0	0	0	0	0	<b>44720</b>	840	16380	12300	74240
S9			0	0	0	<b>91790</b>	0							91790
S10	29820	12000	0	<b>1180</b>	0	0								43000
S11		34800	0	7860	<b>24592</b>	0	1380	0						68632
S12					0	0	<b>126287</b>	0	0	0	0			126287
S13			0	0	0	0	0	<b>61520</b>	0	0	9060	29340		99920
S14					0	0	0	0	0	<b>16720</b>	0	12300	13980	43000
S15								0	0	11744	<b>145776</b>	0	0	157520
S16							0	0	0	0	<b>51570</b>	1200	4620	57390
S17					0	0	0	0	<b>125610</b>	0	0			125610
S18					0	2940	2760	<b>0</b>	33800	0	0	500		40000
S19	13320	<b>26680</b>	0	0	0									40000
S20	0	0	<b>138380</b>	0	0	0	0							138380
Total	48600	73480	211880	73400	73442	165220	199767	73520	199030	85184	219246	73040	41700	1537509

Tabla 4.4: Planificación del algoritmo propuesto para la cosecha diaria (en kg de producto) por sector para la instancia 1. En negrita se indica el día óptimo de cada sector.

sólo día, pero este caso sólo se da ya que estos dos sectores en particular requieren trabajo mecánico de vendimiadoras, las cuales son capaces de abarcar mucho más trabajo diario que el método manual, y para un escenario pequeño como este alcanzan a cubrir toda la cosecha de un sector en un sólo día.

También destaca que el día de mayor cosecha es el 11, abarcando 219.246 [kg] de uva. Con relación a la idea del párrafo anterior es importante notar que del total, 145.776 [kg] fueron cosechados exclusivamente por una máquina vendimiadora en el sector 15.

A partir de este punto se continuará analizando en más detalle la solución anterior (la mejor encontrada) y cómo se llegó a obtenerla. Para esto, se comenzará por comparar la solución con su construcción inicial, antes de aplicar el algoritmo de búsqueda local Hill Climbing. Se verá también la distribución de trabajadores en la construcción inicial. Luego se mostrará en detalle el proceso de la búsqueda local y cómo la solución va mejorando poco a poco. Finalmente, volviendo a la solución final, se detallará la distribución de los distintos tipos de trabajadores en cada sector/día/periodo.

#### ■ **Construcción inicial:**

Los resultados de ganancia y costos de la construcción, comparando con los de la solución final se muestran en la **Tabla 4.5**. En la tabla, la primera fila representa a la construcción inicial (antes de realizar la búsqueda local) y la segunda fila muestra la solución final. Además, la última fila indica en porcentaje de diferencia entre las dos anteriores. En cada columna se indican distintas métricas de interés, donde la primera columna indica la utilidad (en USD) de la planificación (*ganancia – costos*), la segunda columna indica la ganancia, la tercera muestra la suma de todos los costos, y la cuarta columna indica la cantidad de contrataciones de trabajadores variables que fueron necesarios para satisfacer la planificación en cada caso.

Recordando, la solución encontrada requiere de sólo 513 contrataciones, esto quiere decir que el algoritmo propuesto fue capaz de repartir la carga de trabajo de tal manera que reduce esta cantidad desde 1759 a 513, equivalente a una reducción de 71 %. Gracias a esto, se reducen los costos totales en 67 %, generando un aumento de 401 % en la utilidad final de

	Utilidad	Ganancia	Costo Total	Contrataciones
Construcción Inicial	88331	660960	572629	1759
Solución Final	442659	631247	188587	513
%	+401 %	-4 %	-67 %	-71 %

Tabla 4.5: Comparación de los resultados generales entre la planificación de la construcción inicial y de la solución final para la instancia 1.

la solución. Y destaca especialmente que todo esto se logra disminuyendo la ganancia en la pequeña suma de 4 %.

En resumen, se logra encontrar una distribución 5 veces mejor al repartir mejor los tiempos de cosecha y prácticamente sin reducir la calidad del producto (ganancia).

Se muestra en la **Tabla 4.6** un resumen por periodo de la planificación entregada por la construcción inicial, para los sectores que tienen su óptimo entre los días 4, 5 y 6. Se eligen estos días por ser los más requeridos, al tener la mayor cantidad de sectores con su óptimo en esos días. En la tabla, cada fila representa un sector y cada columna un día específico, donde cada columna se subdivide en los dos periodos del día (P1 y P2). La última fila representa la cantidad total de contrataciones requeridas para cada periodo de cada día.

De esta forma, se observa que para el día 5 la construcción inicial requiere de 1759 trabajadores variables. Este es el mayor valor de todos los días y por tanto define la cantidad de personal a contratar.

#### ■ Proceso de búsqueda local Hill Climbing:

A continuación se estudia cómo es transformado el resultado anterior luego de aplicar el algoritmo propuesto, transformando la construcción inicial a través de movimientos (recordando el capítulo **3.1.4 Movimientos**). En total se aplicaron 1271 movimientos, y se observa su distribución en la **Tabla 4.7**, que indica la cantidad de veces que se utiliza cada uno de los movimientos implementados. Además, el uso progresivo de los movimientos se muestra de forma gráfica en la **Figura 4.1**, donde el eje X representa la cantidad de movimientos

Sector/Día	D4		D5		D6	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2
S3	0	0	0	0	<b>105</b>	<b>105</b>
S4	<b>334</b>	<b>334</b>	0	0	0	0
S5	0	0	0	0	<b>364</b>	<b>304</b>
S6	0	0	<b>686</b>	<b>686</b>	0	0
S7	0	0	<b>501</b>	<b>501</b>	0	0
S10	<b>159</b>	<b>159</b>	0	0	0	0
S11	0	0	<b>572</b>	<b>572</b>	0	0
Suma	493	493	1759	1759	469	409

Tabla 4.6: Contrataciones utilizadas en la construcción inicial (antes de aplicar Hill Climbing) por periodo para cubrir los sectores con óptimo entre los días 4, 5 y 6.

aplicados en el tiempo, y el eje Y la utilidad de la solución en cada momento.

Movimiento	Cantidad
1	1246
2	23
3	2
4	0
5	0
Total	1271

Tabla 4.7: Tipos de movimientos aplicados en la instancia 1.

Resulta evidente la predominancia del **Movimiento 1**, encargado de reducir el personal a contratar repartiéndolo equitativamente entre todos los días, para finalmente hacer pequeñas modificaciones adicionales con los otros movimientos. En este caso particular los movimientos 4 y 5 no fueron utilizados ya que con la específica distribución a la que se llegó, no representaban ninguna mejora.

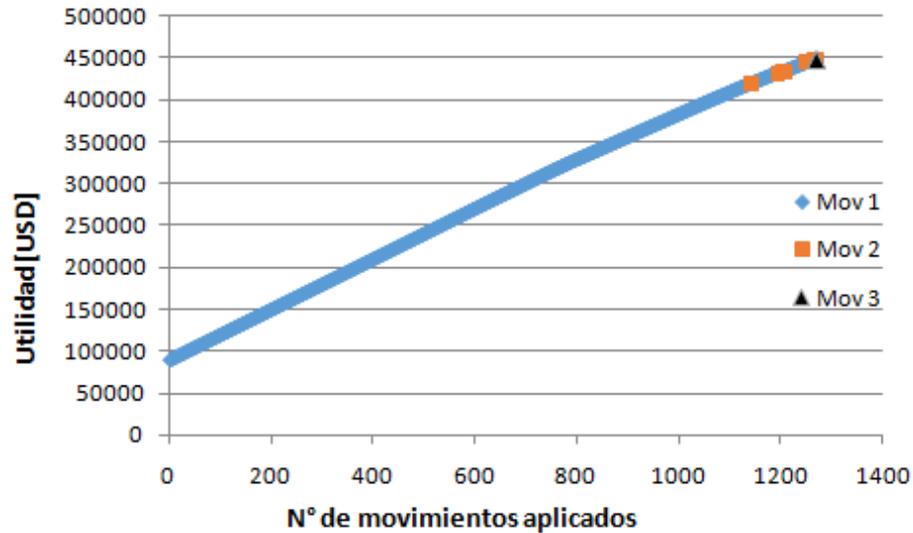


Figura 4.1: Proceso de convergencia a la solución final para la instancia 1.

■ **Distribución de los trabajadores variables o contratados:**

Finalmente, en la **Tabla 4.9** se muestra cómo fue transformado el resultado luego de aplicar el algoritmo propuesto, viendo la cantidad de mano de obra que es necesario contratar para cubrir la cosecha de la planificación final en la **Tabla 4.4**.

De la nueva organización definida en la **Tabla 4.9** resulta evidente el orden que se ha establecido, al ver en la última fila que casi todos los días requieren la misma cantidad de 513 contrataciones.

Para estudiar mejor este resultado, se utilizará la **Tabla 4.8** que es un extracto de la tabla anterior para tres sectores particularmente conflictivos. Estos sectores son conflictivos porque todos tienen su óptimo en el día 5, el cual a su vez es uno de los días más requeridos por estar cerca de la mitad del periodo de cosecha. Estos sectores son el 6, 7 y 11.

Se observa como la cosecha de cada sector se separa en procesos que abarcan varios días, logrando distribuir a los trabajadores en hasta 6 días para los sectores del ejemplo. Destaca particularmente que en casi todos los periodos se utiliza el máximo de 513 contrataciones, aprovechándolas lo más posible al contrario del resultado obtenido con la construcción en la **Tabla 4.6**.

Sector/Día	D2		D3		D4		D5		D6		D7	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
S6	0	0	412	339	0	0	<b>70</b>	<b>101</b>	85	83	141	141
S7					262	260	<b>214</b>	<b>231</b>	0	0	24	11
S11	292	288	0	0	60	71	<b>229</b>	<b>181</b>	0	0	16	7
Suma	292	288	412	339	322	331	513	513	85	83	181	159
% Total	57 %	56 %	80 %	66 %	63 %	65 %	100 %	100 %	17 %	16 %	35 %	31 %
Total	513	513	512	513	513	513	513	513	513	513	513	513

Tabla 4.8: Contrataciones utilizadas por periodo para cubrir los sectores 6,7 y 11 de la primera instancia, la suma de contrataciones entre dichos sectores, y por último su porcentaje del total de contrataciones entre todos los sectores.

S/D	D1		D2		D3		D4		D5		D6		D7		D8		D9		D10		D11		D12		D13		
	P1	P2																									
S1																											
S2																											
S3																											
S4	67	24	0	0	3	42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S5			89	131	8	1	174	178	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S6			412	339	0	0	0	0	70	101	85	83	141	141	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S7					262	260			214	231	0	0	24	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S8																											
S9			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S10	148	149	0	0	0	0	17	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S11			292	288	0	0	60	71	229	181	0	0	16	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S12																											
S13			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S14																											
S15																											
S16																											
S17																											
S18																											
S19	112	110	221	225	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	327	283	513	513	512	513	513	513	513	513	513	513	513	513	513	513	513	513	513	513	513	513	513	505	513	409	106

Tabla 4.9: Distribución de los trabajadores variables por periodo en la planificación de la instancia 1.

Destaca también que entre nada más que estos tres sectores se cubren todas las 513 contrataciones disponibles para el día 5, y que a su vez cubren más del 50 % para los días 2, 3 y 4. Esto provoca que otros sectores tengan que adaptarse a los cada vez más escasos recursos a medida que se van utilizando. Es más, dado que estos 3 sectores tienen sus óptimos en el día 5 y son tan concurrentes lleva a pensar que probablemente sean los que definen para el algoritmo el número máximo de 513 contrataciones, ya que observando la **Tabla 4.4** no parece haber otro rango de días en el que compitan tanto los sectores.

#### ■ **Distribución de los trabajadores fijos:**

Para este caso, también resulta interesante analizar la distribución de los trabajadores fijos para el resultado final. Esta se muestra en la **Tabla 4.10**.

Su distribución es bastante simple, los trabajadores fijos se dividen entre los sectores 2, 3 y 10.

Cabe notar que para el sector 2, día 13 y periodo 2 se utilizan sólo 40 de los 50 disponibles. Este cambio se debe a la aplicación del **Movimiento 3** (mostrado en la **Tabla 4.7**), indicando que es más conveniente dar ese periodo de tiempo libre a los trabajadores fijos, para en cambio utilizar más trabajadores variables en un día más cercano al óptimo del sector.

#### ■ **Distribución de las máquinas vendimiadoras:**

De la misma forma, puede ser interesante la distribución de las vendimiadoras. En la **Tabla 4.11** se muestran los sectores que tienen la posibilidad de ser cosechadas con máquinas vendimiadoras (definidos en la **Tabla 4.2**), estos son los sectores 9, 12, 15, 17 y 20.

En esta instancia en particular, no se presentan topes de horario ni competición entre la cosecha de los distintos sectores, obteniendo un resultado bastante limpio y ordenado, y aprovechando el uso de máquinas para todos los sectores con dicha opción disponible y dentro de su día óptimo sin problemas, excepto por el sector 15 que requiere de un periodo adicional de trabajo debido a su producción.

Sector/Día	D1		D2		D3		D4		D5		D6		D7		D8		D9		D10		D11		D12		D13		Total
	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2																	
S1							0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S2									0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	50	50	50	50	50	50	50	40	490
S3			50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50										600
S4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S5			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S6			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S7							0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S8											0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S9							0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S10	50	50	50	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200
S11			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S12									0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S13			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S14											0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S15																											0
S16													0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S17									0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S18											0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	40	1290

Tabla 4.10: Distribución de los trabajadores fijos por periodo en la planificación de la instancia 1.

S/D	D1		D2		D3		D4		D5		D6		D7		D8		D9		D10		D11		D12		D13		Total
	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2																	
S9					0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0											2
S12									0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
S15															0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	3
S17									0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2	
S20	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0										2	
Total	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	11

Tabla 4.11: Distribución de las vendimiadoras.

### 4.2.2. Instancia 1: Solver Gurobi

En esta sección se compararán los resultados del algoritmo presentado, con los de un programa solver. El solver utilizado es Gurobi con código basado en Python.

La mejor solución encontrada por el solver para la primera instancia, y comparándola con la del algoritmo propuesto (**Tabla 4.3**) se muestra en la **Tabla 4.12**.

	Utilidad	Ganancia	Costo Total	Contrataciones
Algoritmo	442659	631247	188587	513
Solver	456717	629362	172645	477
%	+3 %	-0,3 %	-8 %	-7 %

Tabla 4.12: Comparación de los resultados generales entre la planificación del algoritmo propuesto y la de Gurobi para la instancia 1.

Se observa que el solver encuentra una solución levemente mejor que el algoritmo propuesto, aumentando las utilidades en un 3 % mientras que la ganancia sólo se reduce en 0,3 %. La diferencia parece verse reflejada en los costos que disminuyen en 8 % debido a la reducción de contrataciones.

De forma equivalente a la **Tabla 4.4** para el algoritmo, en la **Tabla 4.13** se muestra el desglose diario de la cosecha por sector, para el resultado del solver.

La planificación parece ser bastante similar a la generada por el algoritmo, lo cual es de esperarse ya que el escenario es el mismo y por lo tanto se repiten factores como la concentración de sectores con su día óptimo cercano al día 5. En la **Tabla 4.14** se muestra la distribución de los trabajadores variables contratados para cubrir esta cosecha.

Comparando con la **Tabla 4.9**, se observa la disminución de contrataciones totales a 477 desde 513, y que esta misma cantidad se utiliza casi completamente en los días extremo (1 y 13). A diferencia del algoritmo propuesto que no asigna tanto trabajo a estos días. Además destaca que cada sector es cosechado durante menos días, conllevando un elevado número de contrataciones en su día óptimo. Por ejemplo en el sector 3, donde trabajan todos los 477 trabajadores durante el día D6. Ocurre de forma similar en el sector 7 día D5, sector 13 día

S/D	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	Total
S1				0	0	0	<b>39960</b>	0	0	40				40000
S2				0	0	0	0	0	<b>54960</b>	0	0	0	29900	84860
S3			3190	0	0	<b>69240</b>	12120	0						84550
S4	40000	0	0	<b>0</b>	0	0	0							40000
S5			8640	0	0	<b>0</b>	17160	0	14200					40000
S6	320	29880	40560	<b>11520</b>	0	0	0	0						82280
S7			2690	<b>57360</b>	0	0	0	0						60050
S8			0	0	0	0	0	0	0	<b>26520</b>	10200	0	37520	74240
S9			0	0	0	<b>91790</b>	0							91790
S10	17200	0	0	<b>25800</b>	0	0								43000
S11		40672	27480	120	<b>360</b>	0	0	0						68632
S12			0	0	0	0	<b>126287</b>	0	0	0	0			126287
S13			0	0	0	0	0	<b>41040</b>	0	0	1440	57440		99920
S14						0	0	0	0	<b>42480</b>	240	0	280	43000
S15						0	0	0	0	11744	<b>145776</b>	0	0	157520
S16						0	0	0	0	0	<b>57360</b>	0	30	57390
S17					0	0	0	0	<b>125610</b>	0	0			125610
S18					0	0	0	<b>28200</b>	0	120	0	11680		40000
S19	11800	<b>28200</b>	0	0	0									40000
S20	0	0	<b>138380</b>	0	0	0	0							138380
Total	69000	69192	207570	69170	69240	161030	195527	69240	194770	80904	215016	69120	67730	1537509

Tabla 4.13: Planificación de Gurobi para la cosecha diaria (en kg de producto) por sector para la instancia 1. En negrita se indica el día óptimo de cada sector.

S/D	D1		D2		D3		D4		D5		D6		D7		D8		D9		D10		D11		D12		D13			
	P1	P2																										
S1																												
S2																												
S3																												
S4	332	332	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	154	154
S5																												
S6																												
S7																												
S8																												
S9																												
S10	144	144	0	0	0	0	213	213	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S11																												
S12																												
S13																												
S14																												
S15																												
S16																												
S17																												
S18																												
S19	0	1	137	137	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	476	477	477	477	477	477	476	477	477	477	477	477	477	477	477	477	477	477	477	476	477	477	477	477	477	467	468	

Tabla 4.14: Distribución de los trabajadores variables por periodo en la planificación de Gurobi para la instancia 1.

D8, sector 2 día 9 y sector 16 día 11.

Luego haciendo el equivalente a la **Tabla 4.8**, la **Tabla 4.15** muestra un extracto de la tabla anterior con contrataciones para los sectores 6,7 y 11 que comparten como día óptimo el día D5 y nuevamente representan gran parte de la concentración de trabajadores.

Sector/Día	D2		D3		D4		D5	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
S6	1	1	249	249	262	262	<b>0</b>	<b>0</b>
S7					0	1	<b>476</b>	<b>476</b>
S11	339	339	129	129	1	1	<b>1</b>	<b>1</b>
Suma	340	340	378	378	263	264	477	477
% Total	71 %	71 %	79 %	79 %	55 %	55 %	100 %	100 %
Total	477	477	477	477	476	477	477	477

Tabla 4.15: Contrataciones utilizadas para los resultados de Gurobi por periodo para cubrir los sectores 6, 7 y 11 de la primera instancia, la suma de contrataciones entre dichos sectores, y por último su porcentaje del total de contrataciones entre todos los sectores.

Notar que las contrataciones totales en este caso son 477, es decir que entre estos 3 sectores llegan a cubrir el 100 % del personal disponible para el día 5, y más del 50 % para los días 2, 3 y 4. Recordando la **Tabla 4.8**, los resultados son muy similares en ambos casos, estableciendo un claro acuerdo de que estos días son particularmente problemáticos.

Además, como se mencionó anteriormente, el sector 7 día D5 utiliza 476 contrataciones, prácticamente todas las contrataciones disponibles. Debido a esto los otros dos sectores se ven obligados a repartir su cosecha en otros días. En el caso de los trabajadores fijos la **Tabla 4.16** muestra su nueva distribución.

La distribución de los trabajadores fijos resulta bastante similar a la obtenida con el algoritmo propuesto en la **Tabla 4.10**.

Las vendimiadoras fueron repartidas exactamente igual que con el algoritmo propuesto ya que no se requiere mayor decisión porque tienen capacidad de trabajo de sobra para este escenario, lo cual cambiará para los próximos.

S/D	D1		D2		D3		D4		D5		D6		D7		D8		D9		D10		D11		D12		D13				
	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2																	
S1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	48	48
S3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	50	50	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	49	49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S6	0	0	1	1	0	0	38	38	48	48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S7	0	0	0	0	0	0	11	11	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
S9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S10	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S11	0	0	0	0	50	50	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	6	6	1	1	0	0	0	0
S14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	50	1	1	0	0	0	0	1	1
S15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	42	42	0	0	0	0	1	1
S17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	49	49	0	0	0	0	0	0	0	0	49	49	0	0	0
S19	49	49	49	49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	49	50

Tabla 4.16: Distribución de los trabajadores fijos por periodo en la planificación de Gurobi para la instancia 1.

Con esto concluye el análisis de la primera instancia. Se observaron los resultados de planificación para la solución final, para su construcción inicial, y para el solver Gurobi. Se observó en detalle cómo la construcción inicial del algoritmo propuesto fue mejorando a medida que se aplicaron los movimientos implementados, logrando aumentar las utilidades en un 401 % (ver **Tabla 4.5**). Además se mostró la distribución de los distintos tipos de trabajadores para la solución y para Gurobi, encontrando una estructura ordenada en ambos, pero obteniendo una leve mejora de 3 % de utilidades con el solver, al reducir las contrataciones necesarias desde 513 trabajadores hasta 477.

### 4.2.3. Instancia 2: Escenario 1 con 4 periodos al día

Se estudia el mismo escenario anterior pero esta vez se divide el día en 4 periodos en vez de 2, es decir, 4 turnos al día entre los cuales la organización puede ser modificada, por ejemplo, moviendo trabajadores a otro sector, refinando el nivel de detalle de la solución. La **Tabla 4.20** muestra la planificación resultante.

La **Tabla 4.17** reúne los principales indicadores de calidad de la solución. Se muestra la calidad para ambas fases del algoritmo; la construcción inicial y la solución final.

	Utilidad	Ganancia	Costo Total	Contrataciones
Construcción Inicial	154177	659726	505549	1544
Solución Final	424421	635532	211111	555
%	+175 %	-4 %	-58 %	-64 %

Tabla 4.17: Resultados generales para la planificación de la instancia 2.

En esta nueva instancia, la solución final logra una mejora de 175 % respecto a su construcción inicial, llegando a resultados del mismo orden que la **Tabla 4.3** con 2 periodos, a partir de una construcción inicial bastante mejor que la anterior. Para la solución final los costos se reparten según indica la **Tabla 4.18**. Y en cuanto al proceso para llegar a la solución final, nuevamente se realiza un conteo de los movimientos utilizados en la **Tabla 4.19**.

Esta vez sólo se utilizan los movimientos 1 y 2, repitiendo una clara predominancia del primero, encargado de reducir la cantidad de trabajadores contratados, lo cual como indican

Desglose de Costos [USD]			
Vendimiadoras	Fijos	Variables	Transporte
421	23400	173160	14130

Tabla 4.18: Detalle de costos para los resultados generales de la planificación de la instancia 2.

Movimiento	Cantidad
1	990
2	17
3	0
4	0
5	0
Total	1007

Tabla 4.19: Tipos de movimientos aplicados en la instancia 2.

S/D	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	Total
S1				0	0	0	<b>40000</b>	0	0	0				40000
S2				0	0	0	0	0	<b>65360</b>	0	0	3630	15870	84860
S3			23280	2070	0	<b>46540</b>	12660	0						84550
S4	1410	2880	4980	<b>30730</b>	0	0	0							40000
S5			12000	0	0	<b>9270</b>	5590	0	13140					40000
S6		6930	30990	0	<b>39470</b>	4890	0	0						82280
S7			12000	<b>12026</b>	12024	12000	12000	12000						60050
S8					0	0	0	0	0	<b>50000</b>	5640	10830	7770	74240
S9			0	0	0	<b>91790</b>	0							91790
S10	1740	2760	4860	<b>33640</b>	0	0								43000
S11		27840	0	0	<b>27052</b>	5670	8070	0						68632
S12					0	0	<b>126287</b>	0	0	0	0			126287
S13			2460	0	0	0	0	<b>66560</b>	0	0	6360	24540		99920
S14						120	180	0	0	<b>16480</b>	0	20040	6180	43000
S15								0	0	11744	<b>145776</b>	0	0	157520
S16							0	0	0	0	<b>54508</b>	1170	1712	57390
S17					0	0	0	0	<b>125610</b>	0	0			125610
S18					0	0	0	0	0	12000	12000	16000		40000
S19	12120	<b>27880</b>	0	0	0									40000
S20	0	0	<b>138380</b>	0	0	0	0							138380
Total	15270	68290	216950	78440	78548	170304	204787	78560	204110	90224	224284	76210	31532	1537509

Tabla 4.20: Planificación del algoritmo propuesto para la cosecha diaria (en kg de producto) por sector para la instancia 2. En negrita se indica el día óptimo de cada sector.

los resultados parece ser el factor más importante para maximizar las utilidades.

Luego el desarrollo de la solución final a medida que se aplican los movimientos anteriores se muestra en el gráfico de la **Figura 4.2**.

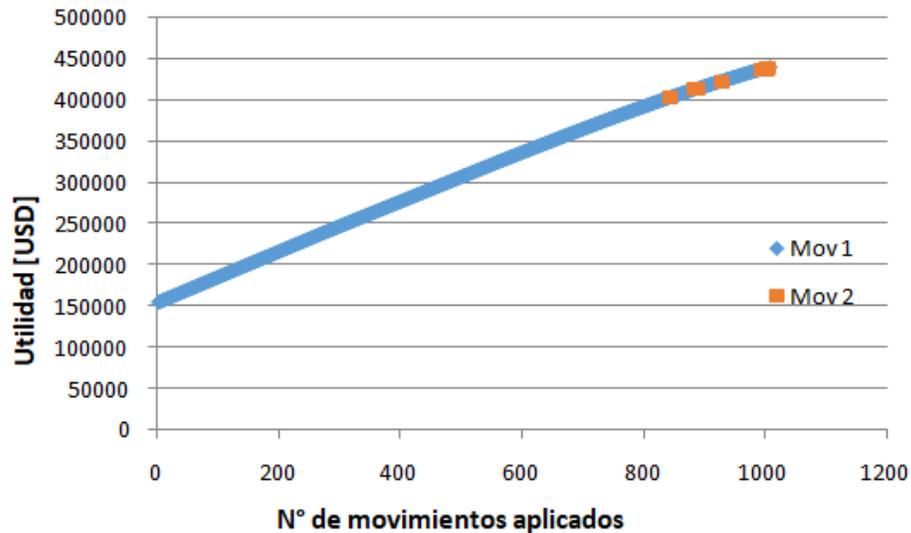


Figura 4.2: Proceso de convergencia a la solución final para la instancia 2.

En este caso, se decidió que sólo los movimientos 1 y 2 fueron necesarios ya que las necesidades de la solución obtenida para esta instancia no requirieron ninguna otra modificación especial.

Además, nuevamente se utiliza el movimiento 2 por el último tramo, haciendo modificaciones que permiten al algoritmo explorar nuevas configuraciones para no sesgar la solución exclusivamente a la reducción de contrataciones, sino que se componga de la mayor cantidad posible de heurísticas desarrolladas en el capítulo anterior, **Propuesta e Implementación**.

En la **Tabla 4.22** (días D1 a D7) y **Tabla 4.21** (días D8 a D13) se muestran las contrataciones necesarias de trabajadores variables por periodo para cubrir la cosecha de todo el viñedo.

S/D	D8				D9				D10				D11				D12				D13											
	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4																
S1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S2	0	0	0	0	<b>547</b>	<b>542</b>	<b>546</b>	<b>547</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28	31	35	27	0	0	0	0	30	34	34	31
S3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S5	0	0	0	0	8	13	9	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S8	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>409</b>	<b>420</b>	<b>415</b>	<b>424</b>	38	39	38	73	82	102	82	95	82	102	82	95	73	38	58	90				
S9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S12	<b>555</b>	<b>555</b>	<b>555</b>	<b>555</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	62	57	58	35	193	173	205	247	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S13	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>146</b>	<b>135</b>	<b>140</b>	<b>131</b>	0	0	0	0	164	208	173	123	0	0	0	0	110	0	93	3				
S14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
S15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>455</b>	<b>459</b>	<b>459</b>	<b>447</b>	9	5	15	10	<b>9</b>	<b>5</b>	<b>15</b>	<b>10</b>	<b>16</b>	<b>15</b>	<b>14</b>	<b>13</b>				
S16	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S18	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	32	36	33	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	508	555	543	535	229	87	199	137								

Tabla 4.21: Distribución de los trabajadores variables por periodo en la planificación de Gurobi para la instancia 2. (Parte 2: D8-D13)



#### 4.2.4. Instancia 2: Solver Gurobi

La **Tabla 4.23** muestra los resultados obtenidos utilizando nuevamente el solver Gurobi para la misma instancia anterior, y comparando con los resultados del algoritmo en **Tabla 4.17**.

	Utilidad	Ganancia	Costo Total	Contrataciones
Algoritmo	424421	635532	211111	555
Solver	456718	629363	172645	477
%	+8 %	-1 %	-18 %	-14 %

Tabla 4.23: Comparación de los resultados generales entre la planificación del algoritmo propuesto y la de Gurobi para la instancia 2.

El solver logra una mejora de las utilidades de un 8 % por sobre el algoritmo propuesto, presentando ganancias casi iguales, pero marcando la diferencia en la reducción de contrataciones en 14 % desde 555 trabajadores hasta 477.

Para visualizar mejor esta diferencia, en la **Tabla 4.25** (días D1 a D7) y la **Tabla 4.24** (días D8 a D13) se muestran las contrataciones necesarias de trabajadores variables por periodo para cubrir la cosecha.

La concentración de trabajo resulta bastante similar a la del algoritmo (**Tabla 4.22**) con la diferencia de que en este caso se aprovechan mejor los días extremos (1 y 13), utilizando el 100 % de las contrataciones para estos días, en contraste al algoritmo que sólo utiliza el 6 % para el día 1 y el 41 % para el día 13, prefiriendo aumentar las ganancias. Sin embargo como han mostrado los resultados, la diferencia de ganancia representa un 1 % mientras que se logra reducir en un 14 % la cantidad de contrataciones y por lo tanto el costo, superando ampliamente el margen de las ganancias.

### 4.3. Escenario 2: 13 Días y 40 Sectores

A continuación se estudia el segundo escenario (recordar **Tabla 4.1: Escenarios**), agregando 20 sectores más al anterior. Las características de los sectores 1 a 20 son las mismas del

S/D	D8				D9				D10				D11				D12				D13											
	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4				
S1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S2	0	0	0	0	<b>358</b>	<b>358</b>	<b>358</b>	<b>358</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150	150	150	150	0	0	0	0
S3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S5	0	0	0	0	119	119	119	119	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S8	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>475</b>	<b>475</b>	<b>475</b>	<b>475</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	58	58	58	58	0	0	0	0
S9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S13	<b>244</b>	<b>244</b>	<b>244</b>	<b>244</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	11	11	11	11	476	476	476	476	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S14	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	258	258	258	258	0	0	0	0
S15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>466</b>	<b>466</b>	<b>466</b>	<b>466</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>466</b>	<b>466</b>	<b>466</b>	<b>466</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S17	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S18	<b>233</b>	<b>233</b>	<b>233</b>	<b>233</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	477	477	477	477	477	477	477	477	477	476	477	476	477	477	477	477	477	476	476	477	477	476	477	476	466	466	466	466	466	466	466	467

Tabla 4.24: Distribución de los trabajadores variables por periodo en la planificación de Gurobi para la instancia 2. (Parte 2: D8-D13)



escenario anterior, detallados en la **Tabla 4.2)**, y los sectores 21 a 40 se muestran en la tabla **Tabla 4.26)**.

Sector	Cosecha	Uvas [kg]	Día óptimo	Día mínimo	Día máximo
21	1	40000	7	4	10
22	1	84860	9	5	13
23	1	84550	6	3	8
24	1	40000	4	1	7
25	1	40000	6	3	9
26	1	82280	5	2	8
27	1	60050	5	4	8
28	1	74240	10	6	13
29	0	91790	6	3	7
30	1	43000	4	1	6
31	1	68632	5	2	8
32	0	126287	7	5	11
33	1	99920	8	3	12
34	1	43000	10	6	13
35	0	157520	11	8	13
36	1	57390	11	7	13
37	0	125610	9	5	11
38	1	40000	8	6	12
39	1	40000	2	1	5
40	0	138380	3	1	7

Tabla 4.26: Características de cada sector para el segundo escenario.

En este caso se espera la mayor cantidad de situaciones conflictivas ya que se duplica la cantidad de sectores a cosechar, manteniendo el rango de tiempo disponible en 13 días.

S/D	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	Total
S1				0	0	0	0	0	19610	20390				40000
S2				0	0	0	1740	0	0	60	0	6502	76558	84860
S3			0	0	0	<b>84190</b>	0	360	0					84550
S4	10860	1200	10336	<b>17064</b>	0	0	540	0	0					40000
S5			0	1620	0	<b>19420</b>	18480	480	0					40000
S6		0	24000	24240	<b>33800</b>	0	240	0	0					82280
S7			9033	0	<b>48017</b>	60	2820	120	0	0	0	71540	2700	60050
S8						0	0	0	0	0	0			74240
S9			0	0	91790	<b>0</b>	0	0						91790
S10	6540	36400	0	<b>60</b>	0	0	0	0						43000
S11		49200	18652	0	<b>120</b>	0	0	660						68632
S12					0	0	<b>126287</b>	0	0	0	0			126287
S13			0	0	0	0	33127	<b>60073</b>	0	240	0	6480		99920
S14					0	0	0	0	0	<b>21074</b>	0	17606	4320	43000
S15								0	0	0	<b>145776</b>	11744	0	157520
S16								0	0	0	<b>33390</b>	0	24000	57390
S17					0	0	0	0	<b>125610</b>	0	0	0		125610
S18					0	0	670	<b>120</b>	25530	13680	0	0		40000
S19	16000	<b>24000</b>	0	0	0	0	0							40000
S20	0	72888	<b>0</b>	65492	0	0	0		0	0				138380
S21				0	3633	24000	<b>12367</b>	0	0	0	0			40000
S22					0	0	0	0	<b>84860</b>	0	0	0	0	84860
S23					0	<b>60</b>	50869	300						84550
S24	16168	22452	0	33321	0	0	840	0						40000
S25			0	<b>540</b>	0	0	0	0	0					40000
S26		0	0	60	<b>39520</b>	0	360	60	0					40000
S27		0	0	240	<b>81740</b>	0	0	300	0					82280
S28				59510	<b>60</b>	240	0	240						60050
S29					0	0	0	0	0	<b>73880</b>	0	360	0	74240
S30	19620	1680	0	<b>21700</b>	0	0	0							91790
S31		0	68632	0	<b>0</b>	0	0	0						43000
S32			0	0	0	0	<b>126287</b>	0	0	0	0			126287
S33			0	0	0	0	0	<b>46820</b>	0	3960	24000	25140		99920
S34					0	0	0	120	0	<b>0</b>	0	39520	3360	43000
S35						0	0	0	0	0	<b>0</b>	72888	84632	157520
S36					0	0	0	0	0	316	<b>56834</b>	240	0	57390
S37					0	0	0	0	<b>0</b>	125610	0	0		125610
S38					0	0	11610	<b>24000</b>	4390	0	0	0		40000
S39	7800	<b>32200</b>	0	0	0	0	0	0						40000
S40	0	0	<b>138380</b>	0	0	0	0	0						138380
Total	76988	240020	260000	232820	259220	259280	259950	259940	260000	259210	260000	252020	195570	3075018

Tabla 4.27: Planificación del algoritmo propuesto para la cosecha diaria (en kg de producto) por sector para la instancia 3. En negrita se indica el día óptimo de cada sector.

### 4.3.1. Instancia 3: Escenario 2 con 2 periodos al día

La planificación de cosecha propuesta por el algoritmo se muestra en la **Tabla 4.27**.

Esta vez se tiene el doble de producto que cosechar, y la combinatoria de posibilidades que tiene el algoritmo para asignar trabajo aumenta fuertemente.

Es de gran importancia notar que casi todos los días se cosecha una cantidad cercana a los 260.000 [kg]. Esto no es coincidencia ya que recordando la **Restricción 4: No sobrepasar la capacidad diaria de los lagares**, coincide con que este número es la capacidad máxima diaria de procesamiento por el conjunto de los dos lagares disponibles de 130.000 [kg/día] cada uno. Esto toma fuerte importancia porque el algoritmo probablemente consideraba más eficiente seguir agregando trabajo en un mismo día pero se vio obligado a repartirlo en otros debido a esta restricción. Es más, el escenario está muy cerca de ser inviable ya que de la capacidad total de los lagares para los 13 días sólo sobran 304.982 [kg] (aproximadamente el 10 % de la cosecha actual), es decir, si se agregara más que esa cantidad de cosecha a la situación actual, se habría necesitado de un día adicional para cubrir el exceso, aumentando considerablemente los costos, de lo contrario se incumpliría con la **Restricción 1: Todo debe ser cosechado**.

Debido a lo anterior, el algoritmo requiere de múltiples intentos para construir una solución inicial que cumpla con todas las restricciones, desechándolas a medida que las va construyendo si se da cuenta de que son inviables, comenzando de nuevo con distintas elecciones aleatorias. Para encontrar la solución final, se intentó construir un total de 29 veces antes de encontrar una situación viable, proceso que tardó 4 segundos en realizarse.

Nuevamente se ejecuta durante 15 minutos el algoritmo, y dentro de este tiempo alcanza a encontrar 9 soluciones distintas demorando 107 segundos por cada una y con un promedio de utilidad de USD 792.514. La **Tabla 4.28** muestra los resultados de la mejor de las soluciones encontradas, en un resumen comparativo entre su construcción inicial y la solución final. Y la distribución de costos de la solución final se muestra en la **Tabla 4.29**.

La rigidez de la solución inicial, es decir, que es más difícil aplicar modificaciones a través de los movimientos sin que esto implique generar un conflicto con las restricciones, resulta en

[USD]	Utilidad	Ganancia	Costo	Contrataciones
Construcción Inicial	549018	1236884	687866	2052
Solución Final	805428	1231401	425972	1197
%	+47 %	-0,4 %	-38 %	-42 %

Tabla 4.28: Comparación de los resultados generales entre la planificación de la construcción inicial y de la solución final para la instancia 3.

Desglose de Costos			
Vendimiadoras	Fijos	Variables	Transporte
818	46800	373464	4860

Tabla 4.29: Detalle de costos para los resultados generales de la planificación de la instancia 3.

un aumento de 47 % en la utilidad respecto a la construcción inicial, reduciendo las contrataciones en 42 % y manteniendo prácticamente igual las ganancias. Destaca que el aumento de utilidad fuera considerablemente menor a los del escenario anterior (ver **Tabla 4.5** y **Tabla 4.17**) con +401 % y +175 % respectivamente. Este hecho tiene relación con la construcción inicial que es mucho mejor en comparación a la de las instancias anteriores, superando la primera instancia en un 621 %, y a la segunda instancia en un 357 %. Esto, debido probablemente a que las restricciones impiden la generación de soluciones demasiado alejadas de los posibles óptimos, es a esto a lo que se refiere al hablar de la rigidez de la solución inicial. La **Tabla 4.30** se realiza el conteo de movimientos aplicados.

Por el mismo motivo anterior, la cantidad de movimientos realizados resulta ser menor que en el escenario 1, considerando que se esperaría lo contrario ya que la combinatoria de posibles movimientos es mucho mayor en el escenario actual. El gráfico en la **Figura 4.3** muestra el desarrollo de la solución final a medida que se aplican los movimientos anteriores.

Nuevamente y como es de esperarse predomina el **Movimiento 1**, pero esta vez destaca la presencia del **Movimiento 5**, esto quiere decir que en cierto punto se reemplazó parte del trabajo de las vendimiadoras por trabajo manual con tal de acercarse al día óptimo, o bien también es probable que fuera necesario cambiar esa cosecha de día para dar espacio a los

Movimiento	Cantidad
1	856
2	29
3	0
4	0
5	3
Total	888

Tabla 4.30: Tipos de movimientos aplicados en la instancia 3.

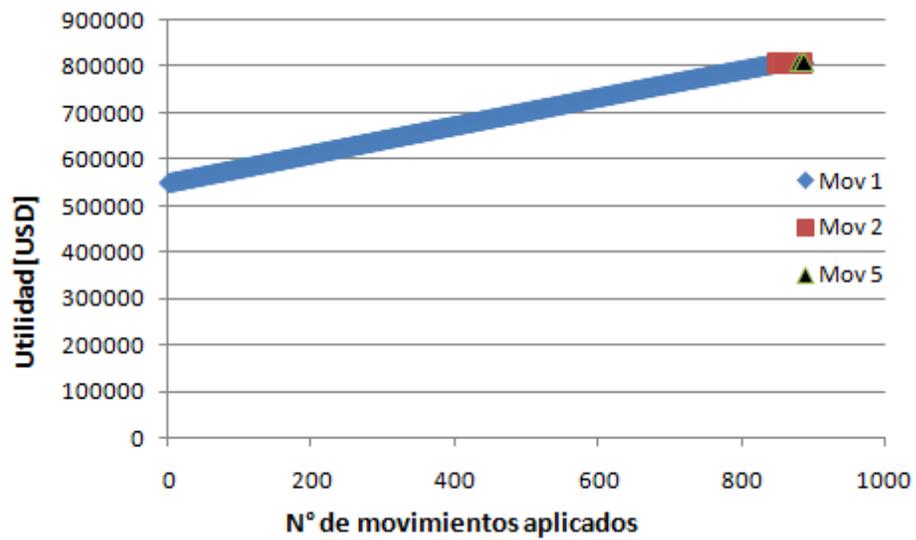


Figura 4.3: Proceso de convergencia a la solución final para la instancia 3.

lagares debido a su estado crítico de capacidad. La tabla **Tabla 4.32** muestra la distribución de las contrataciones a lo largo del periodo.

Lo más destacable de la última tabla es que no se logra distribuir de manera equitativa la cantidad de contrataciones por periodo. En este caso, el número máximo de contrataciones es de 1.197, sin embargo, sólo 17 de los 26 periodos utiliza más de 1.000 contrataciones. Además la distribución queda menos ordenada, programando días en los cuales para su segundo turno trabaja la mitad del personal que para el primer turno, como sucede en los días 3, 7, 10 y 13. Por supuesto, el orden del resultado y la estabilidad de contratación son factores importantes en el planteamiento del problema, pero su ausencia no implica necesariamente una pérdida de utilidades.

### 4.3.2. Instancia 3: Solver Gurobi

La **Tabla 4.31** muestra la comparación de ganancia y costos entre el algoritmo y Gurobi.

	Utilidad	Ganancia	Costo Total	Contrataciones
Algoritmo	805.428	1.231.401	425.972	1.197
Solver	884.565	1.231.750	347.185	960
%	+10 %	+0,03 %	-18 %	-20 %

Tabla 4.31: Comparación de los resultados generales entre la planificación del algoritmo propuesto y la de Gurobi para la instancia 3.

Nuevamente el solver logra una utilidad 10 % mejor que la del algoritmo, reduciendo las contrataciones en 20 %, con lo cual continua siendo una alta suma de 960 trabajadores. La distribución de trabajadores se muestra en la **Tabla 4.33**, y como se verá en la tabla, la diferencia parece estar en la casi perfecta distribución de estos trabajadores a lo largo de los 13 días, no así en el caso del algoritmo propuesto (**Tabla 4.32**) donde se sufre de pérdidas en el primer y último día.

SID	D1		D2		D3		D4		D5		D6		D7		D8		D9		D10		D11		D12		D13		
	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	
S1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	639	765	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S4	94	87	0	20	173	0	278	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	264	60	175	134	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	78	148	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	475	326	0	1	0	47	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S10	58	51	209	399	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S11	0	0	461	360	311	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S24	200	70	348	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	294	366	0	6	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S30	101	94	0	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S39	70	60	179	359	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Total	523	362	1197	1193	1196	572	1197	1196	1197	1197	1197	1197	1197	635	1197	632	1042	801	1185	644	1021	748	1197	1197	1056	590	

Tabla 4.32: Distribución de los trabajadores variables por periodo en la planificación de la instancia 3.

S/D	D1		D2		D3		D4		D5		D6		D7		D8		D9		D10		D11		D12		D13	
	P1	P2																								
S1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	331	331	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	707	707	0	0	0	0	0	0	0
S3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	539	539	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S4	59	59	0	0	0	0	77	77	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	182	182	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S6	0	0	595	595	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S7	0	0	0	0	0	0	38	37	463	463	0	0	0	0	0	0	0	0	0	415	415	0	0	0	0	0
S8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S10	321	321	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S11	0	0	56	56	161	161	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	618	618	0	0	0	0	0	12	12	1	1	0
S14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	356	356
S15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
S16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	464	464	0	0	0	1
S17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	329	329	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
S19	333	333	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	333	333	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
S22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	63	63	0	0	0	0	0	257	257
S23	0	0	0	0	116	116	0	0	0	0	414	414	111	111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S24	0	0	0	0	0	0	332	332	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S25	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	6	6	3	3	0	0	0	190	190	0	0	0	0	0	0	0
S26	0	0	2	2	682	682	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	495	495	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	274	274	0	0	0	0	343	343
S29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S30	1	1	0	0	0	0	358	358	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S31	0	0	224	224	0	0	154	154	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	0	0	0	0	0	0	0	827	827	0
S34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	266	266	0	0	0	0	0	1
S35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	0	0	0	0
S36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	478	478	0	0	0	1
S37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	8	0	0	0	0	0	1	1	131	131	0
S39	246	246	82	82	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	960	960	960	960	960	959	960	960	960	960	960	960	960	960	960	960	960	960	959	959	960	960	960	960	957	959

Tabla 4.33: Distribución de los trabajadores variables por periodo en la planificación de Gurobi para la instancia 3.

### 4.3.3. Instancia 4: Escenario 2 con 4 periodos al día

En cada instancia nueva la complejidad continúa aumentando, esta vez se vuelve a dividir el día en 4 periodos, lo cual aumenta al doble las posibilidades para asignar y mover el trabajo desde un lugar/periodo a otro.

Debido a esto y a las condiciones ya restringidas del escenario por a la alta cantidad de sectores que cosechar dentro del limitado plazo de días, el algoritmo demoró 232 segundos en lograr construir una solución viable para poder comenzar a modificarla a través de los movimientos. En la **Tabla 4.34** se compara la ganancia y costos resultantes de la construcción inicial con los de la solución final propuesta por el algoritmo.

	Utilidad	Ganancia	Costo Total	Contrataciones
Construcción Inicial	508965	1216799	707834	2116
Solución Final	772404	1213840	441435	1206
%	+52 %	-0,2 %	-38 %	-43 %

Tabla 4.34: Comparación de los resultados generales entre la planificación de la construcción inicial y de la solución final para la instancia 4.

Se observa que la construcción inicial ya tiene una utilidad bastante alta de 508.965 USD, especialmente al recordar que las construcciones de la primera instancia son inferiores a USD 100.000, lo cual vuelve a reflejar la limitada cantidad de soluciones viables para este escenario. La distribución de costos de la solución final se muestra en la **Tabla 4.35**.

Desglose de Costos			
Vendimiadoras	Fijos	Variables	Transporte
783	46800	376272	17100

Tabla 4.35: Detalle de costos para los resultados generales de la planificación de la instancia 4.

Comparando con los resultados obtenidos en la misma instancia utilizando 2 periodos al día (**Tabla 4.28** y **Tabla 4.29**), se observa que la anterior genera 4,3 % más utilidad que en este caso. Cabe notar que esta solución habría sido mejor que la anterior de no ser por el costo de

transporte, el cual incrementó en un 252 %. Esto, ya que al separar en día en más periodos, también aumenta la cantidad de posibles viajes entre sectores.

En la tabla **Tabla 4.36** se realiza el conteo de movimientos para obtener la solución final. Y el desarrollo de la solución final a medida que se aplican los movimientos anteriores en la **Figura 4.4**.

Movimiento	Cantidad
1	911
2	0
3	0
4	0
5	6
Total	917

Tabla 4.36: Tipos de movimientos aplicados en la instancia 4.

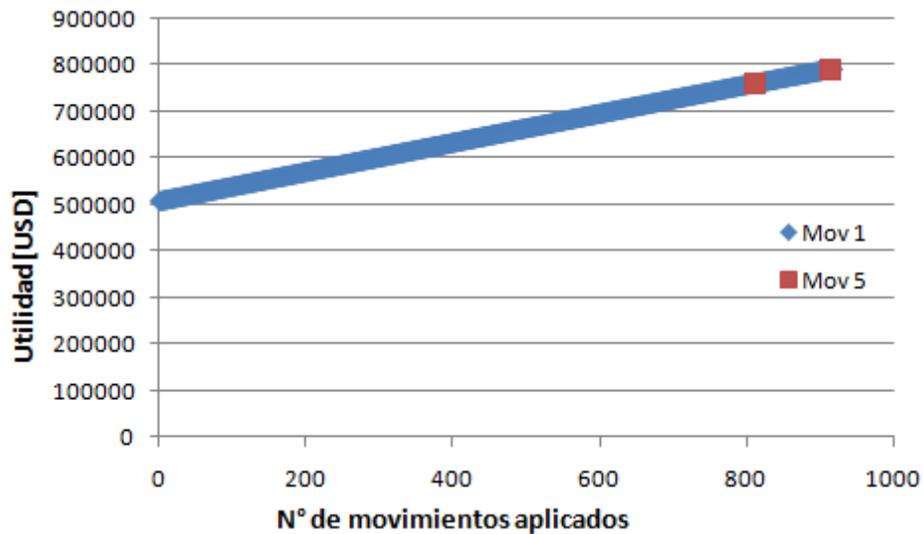


Figura 4.4: Proceso de convergencia a la solución final para la instancia 4.

Una vez más, y como es de esperarse, predomina el movimiento 1, sin embargo aparece por primera vez su combinación con el movimiento 5. Recordando, el **Quinto movimiento** se dedica a reemplazar el trabajo de las máquinas vendimiadoras, por trabajadores variables que hayan disponibles (no aumenta el número total de contrataciones). El movimiento se ejecutó

6 veces, lo que significa que hay 6 periodos en los cuales originalmente habían máquinas vendimiadoras pero ahora hay suficientes trabajadores variables adicionales para realizar la misma cosecha. Estos trabajadores se encontraban disponibles para su uso pero no estaban siendo utilizados en esos periodos en específico, debido a la política de **Permanencia del personal**. Gracias a esto, el movimiento permite aprovechar a estos trabajadores sin generar costo adicional, y ahorrando en el costo de uso de las máquinas vendimiadoras. Incluso existe la posibilidad de que se hayan aumentado las ganancias en caso de que este cambio haya permitido mover la cosecha de algún sector a un día más cercano a su día óptimo.

#### 4.3.4. Instancia 4: Solver Gurobi

La comparación entre la ganancia y costos del algoritmo y Gurobi se muestra en la **Tabla 4.37**.

	Utilidad	Ganancia	Costo Total	Contrataciones
Algoritmo	772.404	1.213.840	441.435	1.206
Solver	885.057	1.230.065	345.008	953
%	+15 %	+1,3 %	-22 %	-21 %

Tabla 4.37: Comparación de los resultados generales entre la planificación del algoritmo propuesto y la de Gurobi para la instancia 4.

Esta vez el solver logra un aumento de utilidad de 15 % e incluso obtiene mejores ganancias en un 1.3 % con respecto al algoritmo propuesto. Esto parece evidenciar que dentro del limitado tiempo establecido para encontrar soluciones, el algoritmo propuesto tiene dificultad para casos altamente restringidos como lo es este escenario.

### 4.4. Escenario 3: 17 Días y 40 Sectores

En este tercer y último escenario se le da al algoritmo más espacio para planificar la organización al agregar 4 días al proceso. Las características de los sectores se muestran en

la **Tabla 4.38**. Por supuesto, esto también implica mayores costos debido principalmente a la contratación de personal por más tiempo, así como el uso extendido de las máquinas vendimiadoras.

#### **4.4.1. Instancia 5: Escenario 3 con 2 Periodos al día**

La planificación de la cosecha entregada por el algoritmo se muestra en la **Tabla 4.41**.

Resulta apreciable la decisión de no usar los días 1 y 17. Esto implica que el algoritmo prefiere ahorrar en costos de contratación esos días y a la vez no alejarse demasiado de los días óptimos, efectivamente transformando el escenario en uno de 15 días. Notar también que aún usando 15 días, los días 6, 7, 8, 9, 11, 13 y 14 tienen ocupado el 100 % de capacidad de los lagares (260.000 [kg/día]), es decir que este continua siendo un factor limitante para la búsqueda de una solución, pero no lo suficientemente restrictivo como para tomar la decisión de usar más días. Por otro lado, si se deseara construir un nuevo lagar para aprovechar mejor esos días, implicaría una gran inversión que puede o no llevar a nuevas soluciones que lo hagan rentable. La **Tabla 4.39** compara los resultados de la construcción inicial y la solución final.

Con el nuevo escenario, dándole más tiempo de cosecha al anterior (ver **Tabla 4.28**), se comprueba que la utilidad final aumentó en un 4.9 % (USD 805.428 a 844.689) y la cantidad de contrataciones se redujo en un 24.2 % (desde 1197 a 907). Es importante recordar que a pesar de la reducción de contrataciones entre escenarios, para el caso actual se utilizan más días, por lo que dichas personas son requeridas más tiempo, contrapesando el costo. Haciendo el cálculo, en el escenario 2 se requieren 1.197 trabajadores por 13 días, con un costo de 24 [USD/día] para un total de  $1,197 \cdot 13 \cdot 24 = 373,464$ . De la misma forma, para el nuevo escenario se tienen 907 trabajadores por 15 días (1 y 17 no fueron utilizados), lo cual resulta en  $907 \cdot 15 \cdot 24 = 326,520$ . Entonces, a pesar de presentar una reducción de 24 % de las contrataciones, el ahorro real de costos se calcula en 12.5 %.

En la **Tabla 4.40** se realiza el conteo de movimientos para llegar a la solución final. Y en la **Figura 4.5** se muestra el desarrollo de la solución final a medida que se aplican los movimientos anteriores.

Sector	Cosecha	Uvas [kg]	Día óptimo	Día mínimo	Día máximo
1	1	40000	7	4	10
2	1	84860	9	5	13
3	1	84550	6	3	8
4	1	40000	4	1	7
5	1	40000	6	3	9
6	1	82280	5	2	8
7	1	60050	5	4	8
8	1	74240	10	6	13
9	0	91790	6	3	7
10	1	43000	4	1	6
11	1	68632	5	2	8
12	0	126287	7	5	11
13	1	99920	8	3	12
14	1	43000	10	6	13
15	0	157520	11	8	13
16	1	57390	11	7	13
17	0	125610	9	5	11
18	1	40000	8	6	12
19	1	40000	2	1	5
20	0	138380	13	7	17
21	1	40000	13	6	17
22	1	84860	15	10	17
23	1	84550	10	5	15
24	1	40000	12	9	14
25	1	40000	16	12	17
26	1	82280	14	11	17
27	1	60050	9	4	14
28	1	74240	11	8	14
29	0	91790	3	1	6
30	1	43000	7	1	11
31	1	68632	13	8	16
32	0	126287	14	10	17
33	1	99920	14	10	17
34	1	43000	10	5	15
35	0	157520	11	7	16
36	1	57390	15	9	17
37	0	125610	8	5	12
38	1	40000	2	1	7
39	1	40000	9	5	14
40	0	138380	7	2	15

Tabla 4.38: Características de cada sector para el tercer escenario.

	Utilidad	Ganancia	Costo	Contrataciones
Construcción Inicial	477404	1286903	809498	1832
Solución Final	844689	1282535	437845	907
%	+77 %	-0,3 %	-46 %	-50 %

Tabla 4.39: Comparación de los resultados generales entre la planificación de la construcción inicial y de la solución final para la instancia 5.

Movimiento	Cantidad
1	926
2	116
3	56
4	8
5	1
Total	1107

Tabla 4.40: Tipos de movimientos aplicados en la instancia 5.

S/D	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17	Total
S1	0	0	0	0	0	0	40000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40000
S2	0	0	0	0	900	3060	0	12010	67570	0	0	1320	0	0	0	0	0	84860
S3	0	0	2820	4137	6420	70813	360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	84550
S4	0	0	0	40000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40000
S5	0	0	0	840	1140	38020	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40000
S6	0	0	6000	28839	46241	1200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	82280
S7	0	0	0	24000	24050	12000	0	0	0	24000	24000	0	0	0	0	0	0	60050
S8	0	0	0	0	91790	0	0	2240	24000	24000	0	0	0	0	0	0	0	74240
S9	0	0	37800	5200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	91790
S10	0	0	9780	6780	51352	720	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	43000
S11	0	0	0	0	0	126287	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	68632
S12	0	0	0	0	0	2400	3960	91880	0	0	0	780	0	0	0	0	0	126287
S13	0	0	0	0	900	0	0	1440	0	35320	0	2880	3360	0	0	0	0	99920
S14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11744	145776	0	0	0	0	0	0	43000
S15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	157520
S16	0	0	0	0	0	0	0	0	3240	37986	15984	180	0	0	0	0	0	57390
S17	0	0	0	0	0	0	0	0	125610	0	0	0	0	0	0	0	0	125610
S18	0	0	0	0	0	0	39760	240	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40000
S19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40000
S20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	138380	0	0	0	0	138380
S21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	38440	0	0	1560	0	40000
S22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	300	82160	2400	0	84860
S23	0	0	0	0	0	0	0	420	0	0	0	12130	24000	24000	24000	0	0	84550
S24	0	0	0	0	0	0	0	0	540	0	0	38260	1200	0	0	0	0	40000
S25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40000	0	40000
S26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1980	79340	960	0	0	82280
S27	0	0	0	0	0	2330	24000	21720	0	0	0	12000	0	0	0	0	0	60050
S28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	74240	0	0	0	0	0	0	74240
S29	0	0	91790	0	0	0	0	1500	0	1840	0	0	0	0	0	0	0	91790
S30	0	0	1980	22820	1380	0	13480	0	0	0	0	60492	2520	3120	0	2500	0	43000
S31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	126287	0	0	0	68632
S32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23293	19707	8220	0	126287
S33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2580	46120	23293	0	0	0	99920
S34	0	0	0	0	0	0	0	1140	0	33460	0	1800	3960	2640	0	0	0	43000
S35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	72888	0	84632	0	0	0	0	0	157520
S36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5850	51540	0	57390
S37	0	0	0	0	0	0	0	125610	0	0	0	0	0	0	0	0	0	125610
S38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40000
S39	0	0	0	0	360	1980	0	0	37360	0	0	300	0	0	0	0	0	40000
S40	0	0	0	0	0	0	138380	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	138380
Total	0	80000	150170	132616	224533	258810	259940	258200	258520	217238	260000	217354	259960	258980	132677	106220	0	3075018

Tabla 4.41: Planificación del algoritmo propuesto para la cosecha diaria (en kg de producto) por sector para la instancia 5. En negrita se indica el día óptimo de cada sector.

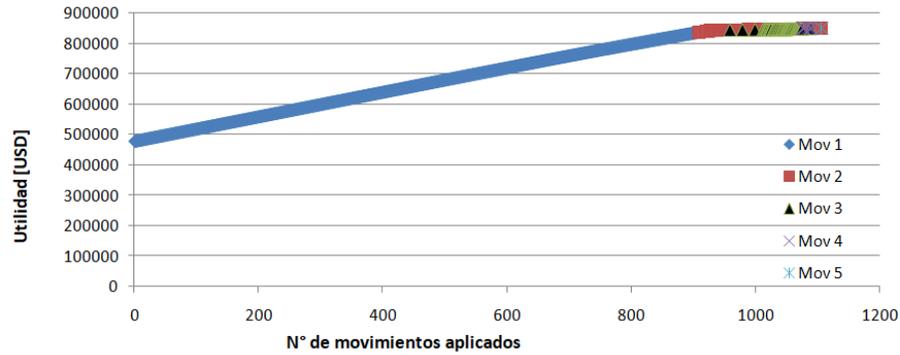


Figura 4.5: Proceso de convergencia a la solución final para la instancia 5.

Por primera vez el algoritmo decide utilizar todos los movimientos disponibles. El primero sigue siendo prioritario, pero los demás representan un número no despreciable. Esto se puede traducir en que la segregación de los trabajadores fue menos esencial que en los casos anteriores, probablemente debido a la ya aceptable distribución de la construcción inicial generada. Por otro lado, observando el gráfico destaca que los movimientos 2 a 5 tienen una pendiente menor, es decir, que en conjunto afectan en menor medida a la solución final en comparación al movimiento 1.

En la **Tabla 4.43** se observa la distribución de contrataciones que cubren la cosecha, según los distintos días y periodos en los que sean solicitados, y al sector que se les asigna:

#### 4.4.2. Instancia 5: Solver Gurobi

Los resultados de Gurobi en comparación al algoritmo se muestra en la **Tabla 4.42**.

	Utilidad	Ganancia	Costo Total	Contrataciones
Algoritmo	844.689	1.282.535	437.845	907
Solver	908.491	1.248.790	340.298	682
%	+8 %	-2,6 %	-22 %	-25 %

Tabla 4.42: Comparación de los resultados generales entre la planificación del algoritmo propuesto y la de Gurobi para la instancia 5.

SID	D2		D3		D4		D5		D6		D7		D8		D9		D10		D11		D12		D13		D14		D15		D16							
	P1	P2																																		
S1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	317	351	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
S2	0	0	0	0	0	15	0	31	0	642	485	0	0	166	35	0	0	0	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0	0	0	0					
S3	0	0	0	47	0	69	0	107	639	482	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
S4	0	0	0	0	0	278	390	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
S5	0	0	0	0	0	0	14	0	19	268	347	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
S6	0	0	0	0	0	330	151	700	71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
S7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
S8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
S9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
S10	0	0	278	60	0	87	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
S11	0	0	112	51	0	113	207	649	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
S12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
S13	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	52	14	741	791	0	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
S14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24	0	0	251	339	0	0	0	0	48	0	56	0	0	0	0	0	0	0	0			
S15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
S16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	54	389	245	267	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
S17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
S18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	320	344	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
S19	334	334	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
S20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
S21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	204	438	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
S22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	622	749	10	30	0	0			
S23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
S24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	388	250	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
S25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
S26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33	573	750	0	16	0	0	0			
S27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
S28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	619	619	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S29	0	0	316	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
S30	0	0	0	33	299	82	0	23	0	0	218	7	0	25	0	0	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	519	490	0	42	0	52	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	0	0	236	323	0	0	0	43	703	66	334	55	285	44	102	35	0	0	0	0	
S35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S38	140	127	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S39	0	0	0	0	0	0	0	6	0	33	0	0	0	0	0	265	359	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Total	474	461	706	291	907	906	907	907	907	907	907	907	722	907	905	907	907	907	907	886	639	907	907	907	907	906	907	906	907	907	907	907	567	805		

Tabla 4.43: Distribución de los trabajadores variables por periodo en la planificación de la instancia 5.

En este caso, el solver obtiene una utilidad de 908.491 USD superando en un 8 % al algoritmo propuesto y disminuyendo las contrataciones en 25 % con una pérdida de ganancia de 2.6 %.

En la **Tabla 4.46** (días D1 a D10) y **Tabla 4.45** (días D11 a D17) se muestra la distribución de los trabajadores contratados.

Notar que esta vez se prefiere utilizar los días borde (1 y 17), contrario a la decisión del algoritmo para la misma instancia, lo cual en consecuencia, al tener más tiempo de trabajo, permite reducir la contratación de personal adicional en un 25 %, lo cual parece ser más favorable que reducir 2 días de trabajo de un total de 17 (11,8 %) considerando personal extra.

#### 4.4.3. Instancia 6: Escenario 3 con 4 Periodos al día

La planificación generada por el algoritmo se observa en la **Tabla 4.47**.

Separando el día en 4 periodos, esta vez si se utilizan los 17 días disponibles aunque el primero y último no son aprovechados al máximo, abarcando sólo 25.360 y 32.750 [kg] respectivamente.

Los resultados de ganancia y costos del algoritmo se muestran en la **Tabla 4.44**. Y en la **Tabla 4.48** el desglose de su distribución de costos.

	Calidad	Ganancia	Costo	Contrataciones
Construcción Inicial	432149	1295096	862946	1963
Solución Final	835728	1279280	443551	889
%	+93 %	-1,2 %	-49 %	-55 %

Tabla 4.44: Comparación de los resultados generales entre la planificación de la construcción inicial y de la solución final para la instancia 6.

Comparando con el resultado del escenario anterior para 4 periodos (ver **Tabla 4.34**), se observa que al sumar 4 días al proceso la utilidad final aumentó en un 8.2 % (772.404 USD a 835.728 USD) y la cantidad de contrataciones se redujo en un 26.3 % (desde 1206 trabajadores a 889).

S/D	D11		D12		D13		D14		D15		D16		D17	
	P1	P2												
S1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S14	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S16	265	265	214	214	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S21	0	0	0	0	310	310	0	0	0	0	0	0	23	23
S22	0	0	0	0	0	0	0	0	414	414	73	73	215	215
S23	0	0	0	0	0	0	0	0	264	264	0	0	0	0
S24	0	0	331	331	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
S25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	330	330	0	0
S26	0	0	0	0	0	0	242	242	0	0	0	0	444	444
S27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S28	417	417	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S31	0	0	0	0	372	372	0	0	0	0	0	0	0	0
S32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S33	0	0	0	0	0	0	439	439	0	0	0	0	0	0
S34	0	0	136	136	0	0	0	0	4	4	0	0	0	0
S35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	279	279	0	0
S37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	682	682	682	682	682	682	682	681	682	682	682	682	682	682

Tabla 4.45: Distribución de los trabajadores variables por periodo en la planificación de Gurobi para la instancia 5. (Parte 2: D11-D17)

S/D	D1		D2		D3		D4		D5		D6		D7		D8		D9		D10	
	P1	P2																		
S1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	135	135	0	0	0	0	0	0
S2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	158	158	0	0	550	550	0	0
S3	0	0	0	0	25	25	0	0	0	0	681	681	0	0	0	0	0	0	0	0
S4	321	321	0	0	0	0	14	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S5	0	0	0	0	134	134	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S6	0	0	0	0	104	104	0	0	184	184	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S7	0	0	0	0	0	0	1	0	498	498	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	295	295
S9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S10	0	1	0	0	0	0	358	358	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S11	0	0	208	208	138	138	28	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	349	349	0	0	0	0
S13	0	0	0	0	281	281	1	1	0	0	0	0	133	133	0	0	0	0	0	0
S14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	224	224
S15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	333	333	0	0	0	0
S19	0	0	141	141	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	229	229	0	0	0	0	0	0
S23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	140	140
S24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S27	0	0	0	0	0	0	279	279	0	0	0	0	24	24	0	0	0	0	0	0
S28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S30	359	359	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	23	23
S35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S38	1	1	333	333	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	132	132	0	0	0
S40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 4.46: Distribución de los trabajadores variables por periodo en la planificación de Gurobi para la instancia 5. (Parte 1: D1-D10)

S/D	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17	Total
S1	2130	0	19542	<b>11728</b>	4470	2130	0											40000
S2	0	3930	5340	22165	<b>35300</b>	12365	0	270	5490									84860
S3	6270	4036	0	<b>69834</b>	1920	2490												84550
S4	0	0	12000	<b>24000</b>	4000	0	0											40000
S5	0	0	10000	<b>24000</b>	6000	0	0											40000
S6	30	23070	1020	<b>57560</b>	600	0	0											82280
S7	6216	0	2280	<b>49004</b>	1140	1410												60050
S8	0	0	0	0	2240	<b>24000</b>	24000	0	0									74240
S9	0	0	0	0	<b>91790</b>	0												91790
S10	14100	690	750	<b>26530</b>	0	930												43000
S11	1650	1020	65902	0	60	0	0											68632
S12	0	0	0	0	0	<b>126287</b>	0	0	0	0	0							126287
S13	6390	0	2880	48445	<b>36655</b>	5400	0	150										99920
S14	0	0	0	0	60	0	0	90	0	42850	0							43000
S15	0	0	0	0	0	0	0	72888	0	84632	0							157520
S16	0	0	0	0	30	540	426	<b>51684</b>	4590	120								57390
S17	0	0	0	0	0	0	0	<b>125610</b>	0	0								125610
S18	0	0	0	0	1950	2730	<b>33040</b>	2160	0	120								40000
S19	0	<b>40000</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>138380</b>	0	0	0	0	40000
S20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10000	<b>24000</b>	6000	0	0	0	40000
S21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18000	<b>24000</b>	24000	18860	84860
S22	0	0	0	0	0	0	0	1080	<b>68858</b>	0	7082	0	2310	5220				84550
S23	0	0	0	0	0	0	0	330	0	0	<b>38140</b>	660	870					40000
S24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>40000</b>	0	40000
S25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40000
S26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1140	570	<b>68480</b>	1800	2580	7710	82280
S27	90	9960	960	18720	1410	<b>24860</b>	0	0	1170	1200	1680							60050
S28	0	0	0	0	0	0	0	21720	0	0	<b>38540</b>	13980	0	0				74240
S29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	91790
S30	1260	1290	1530	600	0	1560	<b>33220</b>	2220	1320	0	0	60	<b>62992</b>	660	3360	1560		43000
S31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>126287</b>	0	0	0	68632
S32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	126287
S33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2370	25088	<b>26473</b>	36029	4980	4980	99920
S34	0	0	0	0	600	0	0	420	<b>24869</b>	0	7751	0	3930	5430				43000
S35	0	0	0	0	0	0	0	11744	<b>145776</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	157520
S36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	450	0	990	<b>53340</b>	1410	1200		57390
S37	0	0	0	0	0	0	0	<b>125610</b>	0	0	0	0	0					125610
S38	10000	<b>24000</b>	6000	0	0	0	0	0	0	0	0	90	1410	780				40000
S39	0	0	0	1320	1290	2400	<b>32710</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40000
S40	0	0	0	101936	36444	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	138380
Total	25360	67660	148820	130524	232460	258740	256820	255860	255950	215150	260000	214845	259910	256460	129179	74530	32750	3075018

Tabla 4.47: Planificación del algoritmo propuesto para la cosecha diaria (en kg de producto) por sector para la instancia 6. En negrita se indica el día óptimo de cada sector.

En la **Tabla 4.49** se realiza el conteo de movimientos para llegar a la solución final. Y el desarrollo de la solución final a medida que se aplican los movimientos anteriores se muestra en el gráfico de la **Figura 4.6**.

Desglose de Costos			
Vendimiadoras	Fijos	VARIABLES	Transporte
829	61200	362712	18750

Tabla 4.48: Detalle de costos para los resultados generales de la planificación de la instancia 6.

Movimiento	Cantidad
1	1074
2	24
3	1
4	0
5	1
Total	1100

Tabla 4.49: Tipos de movimientos aplicados en la instancia 6.

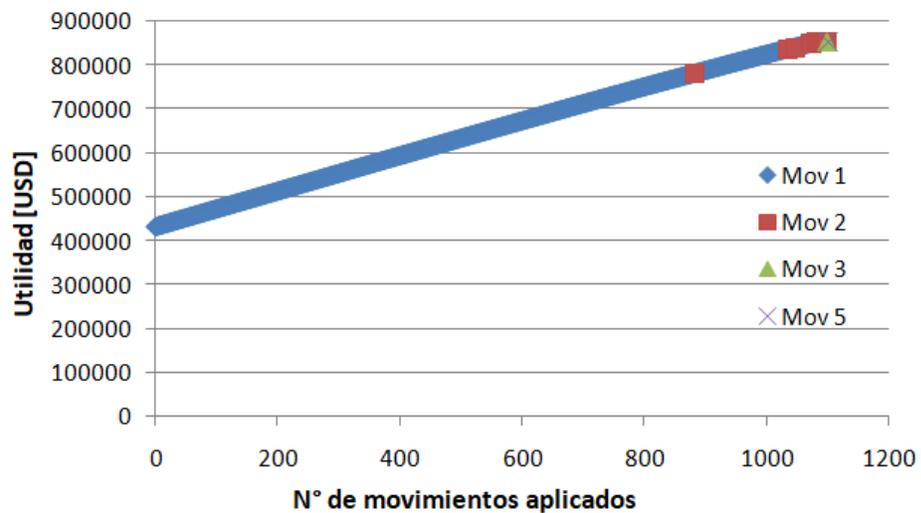


Figura 4.6: Proceso de convergencia a la solución final para la instancia 6.

Una vez más predomina el primer movimiento, pero destaca la presencia de los movimientos 1, 2, 3 y 5 en conjunto. Esto indica que la construcción inicial fue modificada en 4 formas distintas, utilizando en una sola solución casi todas las heurísticas que fueron implementadas. Los movimientos 2, 3 y 5 realizan cambios en la organización de los trabajadores variables, trabajadores fijos, y vendimiadoras respectivamente, por lo que todos los tipos de trabajo fueron afectados dentro del proceso de convergencia a la solución para la planificación final.

#### 4.4.4. Instancia 6: Solver Gurobi

En la **Tabla 4.50** se realiza la comparación de resultados de ganancia y costos entre Gurobi y el algoritmo propuesto.

	Utilidad	Ganancia	Costo Total	Contrataciones
Algoritmo	835.728	1.279.280	443.551	889
Solver	909.795	1.250.153	340.358	682
%	+9 %	-2,3 %	-23 %	-23 %

Tabla 4.50: Comparación de los resultados generales entre la planificación del algoritmo propuesto y la de Gurobi para la instancia 6.

Para esta última instancia, la búsqueda local logra aumentar la utilidad del algoritmo propuesto en un 9 % al disminuir las contrataciones en 23 % a través de una pérdida de ganancia de 2.3 %.

Además, comparándolo con el resultado de Gurobi para 2 periodos en la instancia 5, hubo una leve mejora de 0.14 % (desde 908.491 hasta 909.795).

# Conclusiones

La agricultura es un campo que todavía tiene mucho estudio por delante, donde cada cultivo tiene sus propias condiciones, riesgos y restricciones, pero muchas de ellas son lo suficientemente similares para ser aprovechadas a la hora de buscar nuevos acercamientos de optimización para generar sistemas de planificación del período de cosecha. Para cada cultivo, existen subproblemas o casos especiales que muchas veces se pasan por alto para evitar mayor complejidad del algoritmo, por lo que en este trabajo se presentó un modelo que intenta contemplar algunos de estos problemas para acercarse un paso más a lo que sería un escenario real.

Basado en los principales acercamientos del estado del arte, se plantea un problema de planificación de cosecha que considera múltiples turnos de trabajo dentro del día y fidelización del personal contratado part time para los periodos de cosecha.

En este trabajo se diseñó e implementó un algoritmo de búsqueda local basado en GRASP y Hill Climbing para solucionar el problema de planificación. El algoritmo consiste en la construcción de múltiples soluciones iniciales distintas, e ir mejorando cada una a través de pequeñas modificaciones iterativas, con el fin de explorar el espacio de búsqueda desde distintos ángulos y luego explotar cada uno lo más posible. La construcción inicial tiene foco 100 % en la ganancia, colocando la mayor cantidad posible de trabajo en los días óptimos de cosecha para cada sector. Por otro lado, los movimientos toman esa solución y buscan mejorar sus utilidades. Se implementaron 5 movimientos enfocados en mejorar la solución. El primero busca reducir la cantidad total de contrataciones de trabajadores variables intentando moverlos a distintos sectores al azar. El segundo movimiento compensa el azar del primero movimiento tomándolos mismos trabajadores variables e intentando llevarlos de vuelta a un

día más cercano al óptimo, siempre que esto signifique un aumento de utilidad. El tercer movimiento verifica si resulta conveniente quitar algunos trabajadores fijos y reemplazarlos por trabajadores variables, en caso de que estos últimos estén disponibles y el cambio resulte conveniente. El cuarto movimiento complementa al tercero, intentando reasignar a los trabajadores fijos que pudieran quedar libres para algún periodo específico. Por último el quinto movimiento verifica si para algún periodo resulta conveniente reemplazar la cosecha realizada por las máquinas vendimiadoras, a favor de trabajadores variables.

Se proponen 3 escenarios basados en datos reales descritos en el estudio de *Ferrer et al. (2008)* [1]. Para cada caso se estudian dos instancias posibles, cada una con distinto número de turnos diarios (2 y 4 turnos). Los resultados se comparan con las soluciones encontradas con el solver Gurobi.

El algoritmo propuesto se enfoca principalmente en la distribución del trabajo, el cual puede ser mecánico o manual, y a su vez el trabajo manual considera trabajadores fijos de la viña y contrataciones de medio tiempo en las fechas de cosecha. Es por esto que la primera distinción del algoritmo es la importancia otorgada a la conservación de trabajadores con experiencia en la viña, refiriéndose específicamente a las contrataciones y a cómo asegurar que las personas contratadas para un día sean las mismas para el siguiente y así ahorrar en tiempos de capacitación y generar confianza en la calidad de su trabajo. La solución propuesta a este problema consiste en contratarlos a todos desde el primer día que sean requeridos hasta el último, independiente de si son realmente requeridos todos esos días o no. Con esto se logra conservar a las personas entregándoles consistencia y seguridad en su trabajo por el tiempo definido. En consecuencia a esta condición, como se observó en el capítulo anterior, la respuesta del algoritmo fue ajustar la cosecha de tal manera que la cantidad de contrataciones a lo largo de todos los días sea lo más equitativa posible, logrando utilizar a la gran mayoría de los trabajadores para casi todos los días, tal como se esperaba.

Otra diferenciación de este trabajo fue, para cada escenario, estudiar la solución encontrada al separar el día en 2 y 4 periodos. Esto hace posible acercarse más a la realidad al disponer de un calendario más refinado, abriendo la posibilidad de organizar distintos turnos de trabajo dentro de un mismo día, y utilizar un mismo trabajador en distintos sectores dentro de un mismo día. Como era de esperarse, esto aumentó considerablemente el espacio de búsqueda

del problema, lo cual se vio reflejado en los resultados de la sección anterior, donde dentro de los 15 minutos que se permitió buscar al algoritmo, para cada escenario, la instancia de 4 periodos siempre encontró menos soluciones viables que la instancia asociada de 2 periodos.

Además, disponer de más periodos habilita mayor movilización de los trabajadores entre sectores, lo cual también conlleva un mayor costo de desplazamiento que se calculó a través de una matriz de adyacencia generada por un algoritmo Dijkstra y un costo asociado por kilómetro recorrido pensando en que se transporta a las personas en camiones. Tomando esta consideración, mientras más periodos habrán más posibles viajes por lo que es de esperarse que el costo de transporte aumente, y eso fue exactamente lo que ocurrió, donde por ejemplo en el primer escenario, la instancia 1 tuvo un costo de transporte de 4.710 USD mientras que en la instancia 2 este valor aumentó a 14.130 USD, exactamente 3 veces más caro.

Los factores mencionados finalmente llevaron a que la solución para 2 periodos fuera mejor que la de 4 en todos los casos estudiados, aunque no se descarta la posibilidad de encontrar soluciones equivalentes o mejores si se le permitiera al algoritmo buscar por más tiempo. Por supuesto, incluso si estas soluciones entregaron menos utilidades, también son más cercanas a la situación que se podría tener en la realidad, por lo que definitivamente no está de más tener en cuenta estos resultados junto con los beneficios y consecuencias que conllevan.

Otro factor importante fue la capacidad de procesamiento diario de los lagares, limitando la cantidad de uva que se puede extraer cada día. Esto fue especialmente notorio en el segundo escenario donde fue necesario cosechar 40 sectores en un plazo de sólo 13 días, donde esta limitación jugó un papel importante ya que casi todos los días se trabajó al máximo de su capacidad, lo cual llevó a distribuir la cosecha de cada sector entre más días y/o en días más alejados de su óptimo, como se observa por ejemplo en la **Tabla 4.27**. Este hecho limitó fuertemente las posibilidades del algoritmo para encontrar una solución, cuyo impacto se vuelve evidente al encontrar mejores resultados para el tercer escenario, donde se tiene la misma situación pero se le otorgan 4 días adicionales de cosecha, permitiendo mayor holgura a la búsqueda.

Otra realización fue que la prioridad que se les da al uso de las máquinas vendimiadoras no siempre es la mejor opción. A pesar de que su razón costo/productividad es mucho mejor que la de los trabajadores manuales, hay ocasiones en que, para priorizar la calidad de la uva

cosechándola en un día específico, resulta conveniente reemplazar parte del trabajo mecánico por manual, ya que las ganancias en calidad pueden llegar a sobrepasar la pérdida en costos. Esto queda evidenciado con la utilización del **Quinto movimiento**.

En términos generales, el algoritmo propuesto favorece levemente maximizar la ganancia (por sobre minimizar costos), por lo que quizás con modelos más agresivos en cuanto al deterioro de la uva con el tiempo (recordar que el costo asociado fue lineal para simplificar), podría presentar mejores utilidades finales en comparación a Gurobi.

Como trabajo a futuro se podrían considerar factores como la probabilidad de lluvia y el mínimo de cosecha diaria si se trabaja un sector. Otra consideración que haría el modelo más realista sería que cada lagar pueda procesar sólo una cepa a la vez, para por supuesto no mezclar el producto o bien perder tiempo limpiándolos antes de hacer el cambio. También existen muchos viñedos que se encargan de procesar la uva de otros viñedos más pequeños y esto suele suceder dentro de las mismas fechas, lo cual podría reflejarse en una probabilidad de que los lagares se encuentren parcialmente ocupados.

# Bibliografía

- [1] Juan-Carlos Ferrer, Alejandro Mac Cawley, Sergio Maturana, Sergio Toloza, and Jorge Vera. “An optimization approach for scheduling wine grape harvest operations.” *International Journal of Production Economics* 112, no. 2 (2008): 985-999.
- [2] Carlos Bohle, Sergio Maturana, and Jorge Vera. “A robust optimization approach to wine grape harvesting scheduling.” *European Journal of Operational Research* 200, no. 1 (2010): 245-252.
- [3] Celso Herrera-Cáceres, Francisco Pérez-Galarce, Eduardo Álvarez-Miranda, and Alfredo Candia-Véjar. “Optimization of the harvest planning in the olive oil production: A case study in Chile.” *Computers and Electronics in Agriculture* 141 (2017): 147-159.
- [4] Kamal Lamsal, Philip C. Jones, and Barrett W. Thomas. “Harvest logistics in agricultural systems with multiple, independent producers and no on-farm storage.” *Computers & Industrial Engineering* 91 (2016): 129-138.
- [5] Mohammed Mesabbah, Amr Mahfouz, Mohamed AF Ragab, and Amr Arisha. “Hybrid modeling for vineyard harvesting operations.” *In Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference* IEEE Press (2016): 1642-1653.
- [6] Jean-Paul M. Arnaout, and Marwan Maatouk. “Optimization of quality and operational costs through improved scheduling of harvest operations.” *International Transactions in Operational Research* 17, no. 5 (2010): 595-605.
- [7] Jena, Sanjay Dominik, and Marcus Poggi. “Harvest planning in the Brazilian sugar cane industry via mixed integer programming.” *European Journal of Operational Research* 230, no. 2 (2013): 374-384.
- [8] Anjom, Farangis Khosro, Stavros G. Vougioukas, and David C. Slaughter. “Development of a linear mixed model to predict the picking time in strawberry harvesting processes.” *Biosystems Engineering* 166 (2018): 76-89.
- [9] He, Pengfei, Jing Li, Dongqing Zhang, and Shan Wan. “Optimisation of the harvesting time of rice in moist and non-moist dispersed fields.” *Biosystems Engineering* 170 (2018): 12-23.

- [10] Feo, Thomas A., Mauricio GC Resende, and Stuart H. Smith. "A greedy randomized adaptive search procedure for maximum independent set." In *Technical report*. Operations Research Group, Mechanical Engineering Department, University of Texas Austin, 1989.
- [11] Rajkumar, M., P. Asokan, N. Anilkumar, and T. Page. "A GRASP algorithm for flexible job-shop scheduling problem with limited resource constraints." *International Journal of Production Research* 49, no. 8 (2011): 2409-2423.
- [12] Bautista, Joaquín, and Jordi Pereira. "A GRASP algorithm to solve the unicost set covering problem." *Computers & Operations Research* 34, no. 10 (2007): 3162-3173.
- [13] Altieri, M., Faeth, P. "Sustainable agriculture." *Encyclopedia of Agricultural Science* 4 (1994): 239–247.
- [14] Bordeu, E., Mira, P., Rivadeneira, R. "Madurez Fenológica: Experiencia en Chile." *Tópicos de Actualización en Viticultura y Enología* (2002), 190–192.
- [15] France, J., Thornley, J. "Mathematical Models in Agriculture." *Butterworths, London* (1984).
- [16] Glen, J. "Mathematical models in farm planning: A survey." *Operations Research* 35 (1987), 641–665.