



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

**OPTIMIZACIÓN ROBUSTA APLICADA
AL MANEJO DE INVENTARIO EN LA
PRODUCCIÓN DE VINOS BAJO
CONDICIONES DE INCERTIDUMBRE EN
LOS TIEMPOS DE FERMENTACIÓN.**

RAIMUNDO JAIME CUADRADO LABRA

Tesis para optar al grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
JORGE RAFAEL VERA ANDREO

Santiago de Chile, (Diciembre, 2013)

© 2013, Raimundo Jaime Cuadrado Labra



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

**OPTIMIZACIÓN ROBUSTA APLICADA AL
MANEJO DE INVENTARIO EN LA
PRODUCCIÓN DE VINOS BAJO CONDICIONES
DE INCERTIDUMBRE EN LOS TIEMPOS DE
FERMENTACIÓN.**

RAIMUNDO JAIME CUADRADO LABRA

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

JORGE VERA ANDREO

SERGIO MATURANA VALDERRAMA

VICTOR ALBORNOZ SANHUEZA

EDUARDO AGOSIN TRUMPER

Para completar las exigencias del grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, (Diciembre, 2013)

*A mis Padres, hermanos y amigos,
que han estado siempre presentes;
Pero también a OLBC y JSF por ser
parte de la motivación de seguir
adelante en el día a día.*

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis se realizó con apoyo parcial del proyecto de la Iniciativa Científica Milenio ICM/FIC P10-024-F, Núcleo Milenio en Información y Coordinación en Redes, en donde se agradece su apoyo para la elaboración de este trabajo.

Me gustaría agradecer a cada una de las personas que de una u otra forma se hicieron partícipes en lo que fue este largo proceso. En primer lugar a quien creo que fue parte fundamental para el correcto desarrollo de esta tesis, el profesor Jorge Vera, quien en todo momento me demostró su gran disposición y voluntad para guiarme. Adicionalmente agradezco a Cecilia Guzmán junto con la viña “Haras de Pirque” por su disposición a facilitar los datos necesarios para la construcción del modelo, y a “Pricing UC” por las flexibilidades laborales entregadas.

Finalmente quisiera agradecer a Fernando Coloma, Ignacio Martínez, Felipe de la Fuente y Alejandro Cataldo por sus aportes, comentarios y sugerencias realizadas durante la elaboración de este trabajo.

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	iv
INDICE DE FIGURAS	viii
INDICE DE TABLAS	x
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos planteados	5
1.2. Hipótesis	6
2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	7
2.1. Fuentes de variabilidad consideradas	8
2.1.1. Efectos de la variabilidad	9
2.1.2. Función de pérdida de calidad	9
2.1.3. Tiempos mínimos, promedios y máximos de fermentación	14
2.1.4. Ventanas de cosecha	17
3. MODELACIÓN TIEMPOS DE FERMENTACIÓN	18
3.1. Modelos previos	18
3.1.1. Modelo Alejandro Mac Cawley	18
3.1.2. Modelo Mac Cawley (2002)	19
3.1.3. Modelo Sergio Toloza	23
3.1.4. Modelo Carlos Bohle	24
3.1.5. Modelo Bohle (2008)	25
3.2. Modelación caso base	31
3.2.1. Formulación modelo nominal	34
3.3. Evaluación inclusión tiempos de fermentación	40

3.3.1.	Modelo sin fermentación	40
3.3.2.	Comparación resultados MSF y MN en escenario determinístico	41
4.	METODOLOGÍAS DE OPTIMIZACIÓN ROBUSTA	46
4.1.	Enfoques analizados	46
4.1.1.	Enfoque Soyster	47
4.1.2.	Enfoque Ben-Tal y Nemirovski	49
4.1.3.	Enfoque Bertsimas y Sim	50
4.1.4.	Enfoque Bienstock y Özbay	53
4.2.	Enfoque utilizado	55
5.	MODELACIÓN PROBLEMA ROBUSTO	57
5.1.	Modelación problema maestro	57
5.2.	Modelación problema adversario	58
5.3.	Presupuesto de incertidumbre	61
6.	RESOLUCIÓN MODELOS	64
6.1.	Solución del problema ante incertidumbre	64
6.1.1.	Resultados modelo diferentes valores de γ	65
6.1.2.	Evaluación resultados ante incertidumbre	70
6.1.3.	Evolución γ vs porcentaje infactible	71
6.1.4.	Evolución γ vs capacidad faltante	73
6.1.5.	Evolución γ vs costos infactibilidad	74
6.1.6.	Evolución γ vs beneficios totales	76
6.1.7.	Evolución γ vs tiempos de resolución	77
6.2.	Modelo seleccionado	79
7.	ANÁLISIS NUMÉRICOS	81
7.1.	Aumento factores función pérdida de calidad	81
7.2.	Reducción de incertidumbre	86
7.2.1.	Reducción de rangos máximos de variabilidad	87
7.2.2.	Reducción de cantidad de días factibles	90

8. CONCLUSIONES 95

Bibliografía 98

ANEXO A. Código AMPL 100

 A.1. Código modelo 100

 A.2. Código .run 105

INDICE DE FIGURAS

1.1 Producción de vinos en Chile: vinos con denominación de origen	1
1.2 Producción de vinos en Chile: volumen según categorías de vino	2
1.3 Exportaciones agrícolas Chile año 2012. Fuente: SAG.	3
2.1 Vinos Tintos: Pérdida de calidad	13
2.2 Vinos Blancos: Pérdida de calidad	13
2.3 Vinos Tintos: Probabilidad de término diaria según tipo de vino	15
2.4 Vinos Blancos: Probabilidad de término diaria según tipo de vino	16
3.1 Graficos cosechas totales por día según modelo	42
6.1 Graficos valor función objetivo según modelo	66
6.2 Ejemplo: Cosechas totales según modelo $\gamma = 50$	66
6.3 Graficos costos operacionales según modelo	68
6.4 Gamma 20: Cantidad de trabajadores por fecha	68
6.5 Graficos costos pérdida de calidad según modelo	69
6.6 Evolución de porcentaje infactible por número de iteraciones para diferentes valores de γ	72
6.7 Evolución de capacidad faltante por número de iteraciones para diferentes valores de γ	74
6.8 Evolución de costos de infactibilidad por número de iteraciones para diferentes valores de γ	75
6.9 Evolución de beneficios totales por número de iteraciones para diferentes valores de γ	77
6.10 Evolución de tiempos totales de resolución por número de iteraciones para diferentes valores de γ	78

7.1 Modelos variación A: Beneficios totales y valor función objetivo	83
7.2 Modelos variación A: Estructura cosechas	84
7.3 Modelos variación A: Cantidad trabajadores	84
7.4 Modelos variación A 100: Estructura cosechas	85
7.5 Modelos reducción variabilidad máxima: Estructura cosechas	88
7.6 Vinos Tintos: Comparación valores α modelos de 0% reducción y 40% reducción	91
7.7 Vinos Tintos: Comparación valores α modelos de 0% reducción y 40% reducción	91
7.8 Modelos reducción días factibles: Estructura cosechas	92
7.9 Modelos reducción días factibles: Comparación costos pérdida calidad vs costos infactibilidad	93

INDICE DE TABLAS

2.1 Valores de la degradación del vino	11
2.2 Factores de penalizaciones de calidad por día de desfase	12
2.3 Vinos Tintos: Tiempos mínimo, promedio y máximo de fermentación según tipo de vino	14
2.4 Vinos Blancos: Tiempos mínimo, promedio y máximo de fermentación según tipo de vino	14
2.5 Vinos Tintos: Probabilidad de término período fermentación en tiempo mínimo, promedio y máximo	15
2.6 Vinos Blancos: Probabilidad de término período fermentación en tiempo mínimo, promedio y máximo	16
2.7 Ventanas de extendidas de cosecha según tipo de cepa	17
3.1 Valores función objetivo MSF vs MN	41
3.2 Valores costos operacionales y costos pérdida calidad MSF vs MN	41
3.3 Beneficios totales MSF vs MN sin incertidumbre	44
3.4 Beneficios totales MSF vs MN con incertidumbre	44
6.1 Valor función objetivos para diferente valores de γ y número de iteraciones . . .	65
6.2 Valor costo operacional para diferentes valores de γ y número de iteraciones . .	67
6.3 Valor costo pérdida de calidad según modelo de γ y número de iteraciones . . .	69
6.4 Evolución de porcentaje infactible por número de iteraciones para diferentes valores de γ	72
6.5 Evolución de capacidad faltante por número de iteraciones para diferentes valores de γ	73

6.6 Evolución de costo de infactibilidad por número de iteraciones para diferentes valores de γ	75
6.7 Evolución de beneficios totales por número de iteraciones para diferentes valores de γ	76
6.8 Evolución de tiempos totales de resolución (en segundos) por número de iteraciones para diferentes valores de γ	78
6.9 Comparación MN, $\gamma = 50$ y $\gamma = 100$	79
7.1 Variación de preponderancia de la función de pérdida de calidad	82
7.2 Resumen resultados modelos variación A	86
7.3 Modelos reducción de variabilidad máxima de incertidumbre	88
7.4 Resumen resultados modelos reducción variabilidad máxima	89
7.5 Resumen resultados modelos ante reducción de días factibles de fermentación .	94

RESUMEN

El presente trabajo busca generar una planificación robusta al proceso de cosechas de una viña productora de vinos, en donde se asume que los parámetros sujetos a incertidumbre son los relacionados con los tiempos totales de los períodos de fermentación de las uvas.

En primer lugar, se realiza una introducción a la problemática a tratar, revisando los modelos desarrollados anteriormente por MacCawley (2008), Toloza (2008) y Bohle (2010). Enseguida se analizan los distintos enfoques existentes de optimización robusta, discutiendo las posibles ventajas y desventajas de cada uno de ellos. Se propone una nueva modelación que incluye los efectos de los tiempos de fermentación, la cual a través de una variación del enfoque propuesto por Bienstock y Özbay (2008), se logran mitigar los efectos respecto de la incertidumbre natural existente en ellos. Luego se demuestra que la inclusión de los tiempos de fermentación genera un cambio significativo en la planificación de las cosechas.

A través de la formulación propuesta, se demuestra que los beneficios en términos de confiabilidad de las soluciones sobrepasan de gran manera los costos adicionales que se generan producto del mayor robustecimiento del modelo, permitiendo generar una planificación completa de la cosecha acorde a las necesidades de un enfoque operativo. Posteriormente se miden los resultados obtenidos en cada uno de los modelos, generando una propuesta respecto del modelo a utilizar de acuerdo a las condiciones estipuladas.

Finalmente se analizan los posibles beneficios de incorporar nuevas tecnologías que permitan reducir los niveles de incertidumbre de los parámetros considerados.

Palabras Claves: incertidumbre, tiempos de fermentación, función pérdida de calidad, costos de infactibilidad, optimización robusta, presupuesto de incertidumbre, problema maestro, problema adversario.

ABSTRACT

The following work aims to generate a robust planification over the process of the harvest of a real vineyard specialized in wine production. This work assumes that the parameters under uncertainty are the ones related to the grape's fermentation times.

At first, it's exposed an introduction of the problematic that a vineyard industry implies, reviewing different models that have been previously developed by Alejandro MacCawley, Sergio Toloza and Carlos Bohle. Then it's discussed the costs and benefits of different approaches that exists on how to treat the robust optimization. It's argued, because of the complex relationship between the parameters under uncertainty, that it's impossible to apply directly any of the existing approach for robust optimization, but using a variation of the approach proposed by Bienstock and Özbay of the adversary problem it's possible to decrease the effects of the natural variation of these parameters.

Along the present work, it has been proved that the inclusion of the fermentation times implies a significant change on the shape of the harvesting process. Also, under the formulation proposed it's proved that the benefits of the increase of the feasibility of the solution exceeds widely the increase of the cost that the robust formulation implies. This allows to generate a complete planification of the harvesting process under a operational focus. The model's results are measured generating a proposal on which model should be the most appropriate for the vineyard.

Finally, it's analyzed the possible benefits of the inclusion of new technology that allows to reduce the levels of uncertainty of the parameters.

Keywords: uncertainty, fermentation times, quality loss function, infeasibility costs, robust optimization, uncertainty budget, master problem, adversary problem.

1. INTRODUCCION

A lo largo de los últimos años la industria chilena del vino ha sufrido un importante crecimiento, reflejado a través de fuertes alzas en sus tasas de producción como de exportaciones. Adicionalmente este crecimiento ha sido avalado con el desarrollo de productos de mayor calidad, generación de nuevos empleos, e innovación de nuevas técnicas de cultivo, transformando a la industria del vino en una importante fuente de ingresos para el país.

Las favorables condiciones climatológicas y del suelo existentes en los valles de Chile han permitido que se puedan desarrollar cepas de gran calidad, las cuales poseen características bastante apreciadas en el mundo. Según cifras del año 2006, la producción de vinos en Chile alcanzó los 844,9 millones de litros aproximadamente (ODEPA, 2007), cifras que son un 7,1% superior respecto a las del año 2005. De este total, un 84,8% corresponde a vinos con denominación de origen (716,4 millones de litros), un 10,2% a vinos sin denominación de origen, y el 5% restante a vinos procedentes de uva de mesa. Estos datos son presentados en la Figura 1.

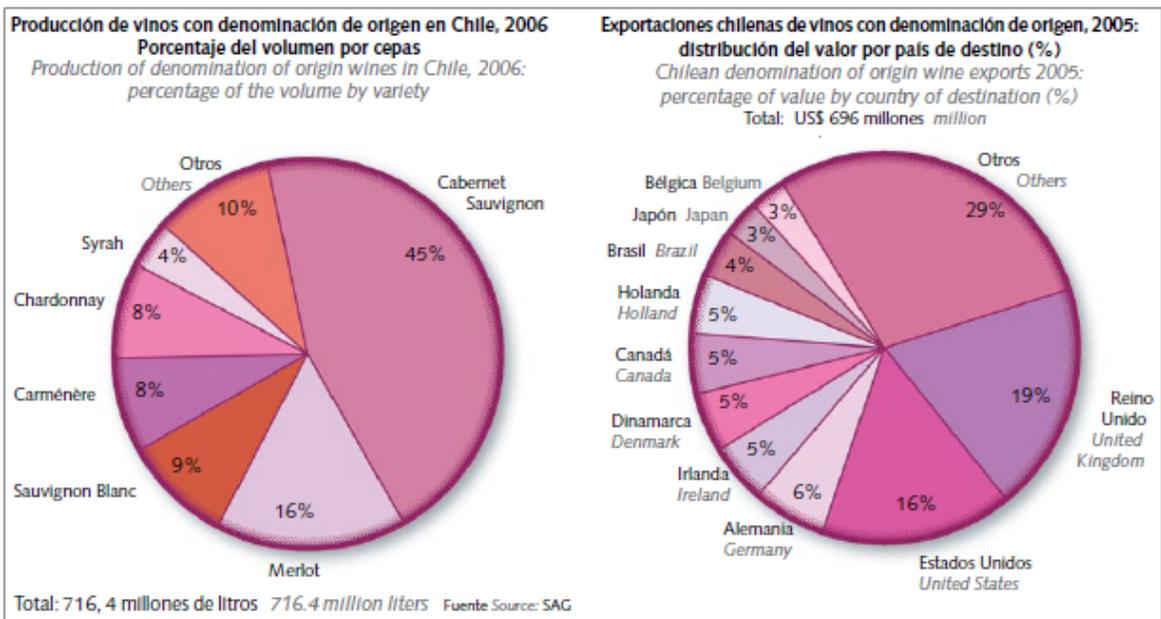


FIGURA 1.1. Producción de vinos en Chile: vinos con denominación de origen

A su vez, durante el 2006, la industria del vino en Chile reportó exportaciones por un total de US\$ 967,9 millones, posicionando a los vinos como el quinto producto de mayor exportación durante ese año. Estas tasas de crecimiento se han mantenido a lo largo del tiempo, como se aprecia en la Figura 1. Durante el año 2012, el rubro del vino alcanzó el segundo lugar respecto de las mayores exportaciones dentro del subsector agrícola, mostrando un crecimiento del 6,0% respecto de las exportaciones del 2011. Estas exportaciones alcanzaron los US\$1.798 millones, en donde los principales mercados de destino correspondieron a la Unión Europea y Asia, que concentraron respectivamente el 37,6% y 20,1% del total de exportaciones. Estos números son presentados en la Figura 1, los cuales reflejan el fuerte crecimiento que ha experimentado el sector vitivinícola en Chile, el cual ha visto potenciado año a año su relevancia en las actividades internas del país.

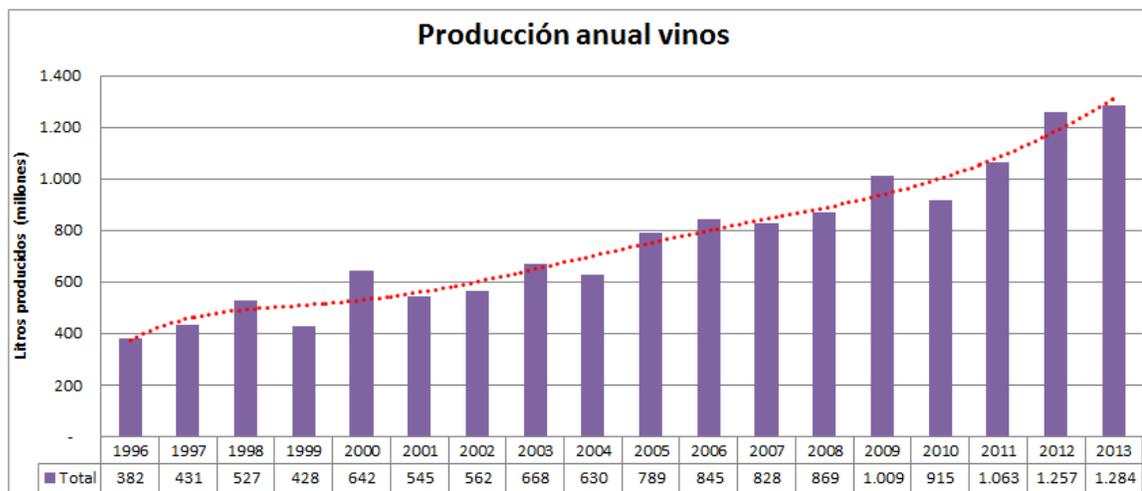


FIGURA 1.2. Producción de vinos en Chile: volumen según categorías de vino.

Fuente: SAG

Actualmente la industria vitivinícola de Chile se encuentra en un estado de constante mejoramiento de sus procesos, en donde la planificación de la producción es uno de los procesos más relevantes para su éxito (Toloza et al, 2008). Diversos son los factores que afectan al resultado de esta planificación, como son los costos de contratación y despido de personal, capacidades de cosecha, costos de reubicación, entre otros. Adicionalmente existen algunos factores que presentan una importante incertidumbre, como por ejemplo

las capacidades de trabajo del personal, las capacidades de almacenamiento en bodega, los tiempos de fermentación y diversos otros. Producto de esta incertidumbre los resultados reales pueden llegar a ser muy distintos a los resultados esperados en la planificación original. En casos aún más extremos, producto de capacidades y factores que difieren de los considerados inicialmente, sucede que las soluciones propuestas en la planificación de las faenas resulten imposibles de ser llevadas a cabo, producto de una subestimación de los recursos necesarios.

EXPORTACIÓN DE PRODUCTOS AGROPECUARIOS, 2011-2012 (Millones de US\$ fob)							
Producto	2012					Part. en 2012 (%)	Var. 12/11 (%)
	I trim.	II trim.	III trim.	IV trim.	Año		
Agrícola	2.974	2.722	1.837	1.874	9.408	87,8	3,9
Fruta (*)	2.031	1.640	932	886	5.490	51,2	0,8
Vino	388	448	437	525	1.798	16,8	6,0
Semilla	141	238	66	23	469	4,4	21,3
Hortaliza	80	79	60	72	290	2,7	-5,7
Los demás	333	318	342	368	1.361	12,7	12,2
Pecuario	320	350	315	322	1.307	12,2	1,7
Carne	218	250	240	255	963	9,0	3,7
Lácteos	65	51	36	39	192	1,8	-1,2
Lana, cuero y piel	6	9	4	4	22	0,2	-23,7
Los demás	31	40	35	25	131	1,2	-2,4
Total agropecuario	3.294	3.072	2.152	2.197	10.715	100,0	3,7
Total exportaciones del país	19.873	19.787	17.450	21.703	78.813		-3,2
Participación en el total exportado (%)	16,6	15,5	12,3	10,1	13,6		

FIGURA 1.3. Exportaciones agrícolas Chile año 2012. Fuente: SAG.

Problemas asociados a la variabilidad de los factores son comunes en casi todos los tipos de industrias, en donde a modo de mitigar los efectos de esta incertidumbre se han aplicado diversas técnicas de modelación matemática que permitan entregar soluciones que estén protegidas frente a las variaciones. Una de estas técnicas es la Optimización Robusta, la cual aparece como una interesante alternativa a la hora de generar soluciones protegidas ante los efectos de la incertidumbre gracias a su relativo grado de simplicidad

en su aplicación. Esta técnica se basa en la existencia de un comportamiento aleatorio por parte de algunos de los parámetros del modelo, en donde a diferencia de otras técnicas de modelación, no se necesita conocer en detalle cual es la distribución de probabilidades de estos parámetros (Birge et al., 1997). En efecto, en la optimización Robusta solo se necesita conocer los valores promedios y rangos de variación máximos de estos parámetros, algo que en la práctica es menos difícil de estimar (Soyster, 1973; Ben-Tal y Nemirovskil, 2001; Ben-Tal et al., 2009). Estudios adicionales respecto de esta técnica han permitido determinar los efectos en los cambios de la variabilidad del valor de la función objetivo numérica y geoméricamente (Bertsimas y Sim, 2004).

Un primer modelo ya ha sido construido en base a esta técnica para la industria del vino, en donde lo que se buscaba era obtener soluciones robustas para la planificación de la producción ante incertidumbre en la productividad del personal en las labores de cosecha (Bohle et al., 2008). Sin embargo, existen una serie de otros factores que no fueron considerados en este modelo que también presentan un alto grado de incertidumbre y que pueden llegar a afectar la factibilidad de las soluciones presentadas. Es por ello que resulta atractivo generar soluciones respecto de estas problemáticas aún no abordadas. En particular uno de estos factores hace referencia a los tiempos de fermentación de las cosechas. Estos tiempos estipulan la cantidad de días que una determinada cosecha deberá permanecer dentro de las barricas de fermentación antes de continuar con sus procesos productivos.

Como se demostrará en secciones posteriores de este trabajo, los tiempos de fermentación de las cosechas son parámetros que influyen fuertemente en la planificación de las cosechas. Visto de manera general, las capacidades de almacenamiento en las bodegas de fermentación de las viñas pueden ser asemejados a las de un problema de flujo de inventario, en donde existe una capacidad limitada en las bodegas internas de las viñas para recepcionar a las cosechas que han de iniciar sus procesos de fermentación. Este flujo es ocasionado según los tiempos de fermentación de las cosechas, en donde al momento que una cosecha finaliza su período de fermentación se libera la capacidad que estas utilizaban en las bodegas, permitiendo así recepcionar a posibles nuevas cosechas. Por ende, en

caso de subestimar estos tiempos de fermentación se puede dar el caso que no exista la capacidad suficiente para recepcionar la totalidad de las cosechas planificadas para ese día, debiendo recurrir a medidas adicionales las cuales poseen unos costos elevados. Del lado contrario, en caso de sobrestimar estos tiempos no se le estará dando un uso eficiente a los recursos disponibles, aumentando así los costos generales de toda la producción.

Dado lo anterior, el enfoque de este trabajo será el de formular un modelo matemático a través de las técnicas de Optimización Robusta que permita mitigar los efectos de la incertidumbre en los parámetros que hacen relación a los tiempos de fermentación de las cosechas. Para ello se presentarán diferentes alternativas de solución, en donde al final se escogerá aquella que nos entregue los mejores resultados.

1.1. Objetivos planteados

Una de las fuentes de incertidumbre que no fue considerada en el modelo planteado en el trabajo de Bohle (Bohle et al., 2008), fue el de la incertidumbre existente en las tasas de procesamiento de la producción que se encuentra en bodega, en otras palabras, los tiempos de fermentación de las cosechas. Estas tasas de procesamiento varían debido a la naturaleza incierta de los procesos de fermentación, en donde la variación de éstas puede ser bastante significativa respecto de los valores esperados. Estas tasas afectan directamente a las capacidades de procesamiento que existirán en bodega para cada período de tiempo, en donde la capacidad de un período determinado dependerá de lo cosechado en los períodos anteriores los cuales aún no se han terminado de procesar (fermentar), y de las cantidades cosechadas para ese mismo período. Con ello los objetivos de este trabajo serán los siguientes:

- (i) Diseñar un modelo para la planificación de una temporada completa de cosechas, en el cual se consideren los tiempos de fermentación para el cálculo de las capacidades de almacenamiento.
- (ii) Determinar los efectos que la incertidumbre genera en la planificación de cosechas, y mitigar los efectos de esta utilizando técnicas de optimización robusta.

- (iii) Cuantificar los beneficios de la reducción en los rangos máximos de incertidumbre para los tiempos de fermentación.

El gran objetivo de este trabajo es demostrar que la inclusión de los tiempos de fermentación de las cosechas si implican un cambio significativo en la planificación de las cosechas. Además se demostrará que los beneficios en términos de confiabilidad de las soluciones sobrepasan de gran manera los costos adicionales que se generan producto del mayor robustecimiento del modelo. Una vez demostrado aquello, se buscará determinar cuál de todos los enfoques propuestos en el modelo del problema adversario es el que entrega los mejores resultados en términos de costos totales y confiabilidad de las soluciones, medidos como la proporción de escenarios en los cuales la planificación sugerida puede ser llevada a cabo. Se buscará además generar una propuesta en donde se recomiende diferentes políticas a seguir, de acuerdo al presupuesto de robustecimiento que se deseé utilizar. Finalmente, se buscará entregar un valor cuantificable respecto de los beneficios que se podrían obtener al invertir en tecnologías que reduzcan los rangos máximos de incertidumbre para las variables consideradas en el modelo.

1.2. Hipótesis

La hipótesis que plantea este trabajo es que la incertidumbre existente en los tiempos de fermentación de las cosechas resulta ser un parámetro que influye fuertemente en el grado de factibilidad de las soluciones. Se plantea que aplicando técnicas de optimización robusta, en particular utilizando una variación del enfoque propuesto por Bienstock y Özbay, es posible generar un modelo que mantenga la estructura lineal del enfoque, y que a su vez entregue soluciones robustas que enfrenten las condiciones de incertidumbre que afectan a la programación de la producción de vinos de una manera eficiente y confiable. A su vez, dada la imposibilidad de aplicar de manera directa el enfoque planteado por Bienstock y Özbay (2008), se utilizarán distintas aproximaciones que se asemejen a lo que es planteado por estos autores, y se seleccionará aquella que entregue los mejores resultados en términos de beneficios globales. Esto será analizado en mayor detalle en el Capítulo 4.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En todo proceso productivo existe una consideración especial a la hora del almacenaje de la producción misma del proceso. Para el caso de la producción de vinos, este problema no es ajeno, en particular para la etapa de fermentación de las cosechas. Este proceso consta de una capacidad limitada, la cual es determinada en gran parte por la cantidad de cubas de fermentación que la bodega disponga, ya que en ellas será donde se dará inicio al proceso que transformará a las cosechas en vinos.

Adicionalmente, el proceso de fermentación consta de diversos factores que afectan a la duración total de éste. Ejemplos de estos corresponden a las condiciones climatológicas, la calidad de las cepas utilizadas, la eficiencia de los trabajadores, entre otros. En particular, estos factores son los que logran definir la capacidad real de almacenaje que se dispondrá para cada período de tiempo, ya que para poder recibir nuevas cosechas, las cosechas realizadas en los días previos deben haber finalizado sus períodos de fermentación. Producto de aquello, estos factores imponen el momento en los que se podrán realizar una nueva cosecha, ya que en caso de no disponer de la capacidad suficiente para poder recepcionar a las mismas, no se podrá llevar a cabo la planificación que se haya estipulado.

Cabe mencionar, que dependiendo de la uva que se esté tratando, éstas solo lograrán una calidad aceptable si son cosechadas dentro de un determinado rango de tiempo, algo que llamaremos *ventana de cosecha*. Fuera de esta *ventana*, la calidad que se obtendría de estas uvas no sería la suficiente como para entrar al proceso productivo (Mac Cawley 2002; Bohle 2008), producto de que la calidad final de los vinos a producir estaría por debajo de los estándares mínimos. Este es un problema que se ve acrecentado para los casos de la producción de vinos de una calidad más refinada, ya que estos tienen unos estándares aún más elevados. En particular, este tipo de vinos requiere la utilización de cubas especiales, las cuales son cruciales para alcanzar los niveles de calidad deseados. Por lo cual, en caso de que estas cubas no se encuentren disponibles en el momento exacto que las cosechas son realizadas, se estará afectando de gran manera la calidad final del vino que se ha de producir.

Es por ello la importancia que adquiere la inclusión de este tipo factores en la definición de los tiempos de fermentación, ya que de esa manera se puede lograr una protección ante las fuentes de incertidumbre. De esta forma, se podrá reducir la probabilidad de que se tenga que retrasar las actividades de cosechas producto de que no se dispone de la capacidad en las bodegas, evitando la respectiva degradación de la calidad final que esto implica.

Para el desarrollo de este trabajo se ha utilizado como base la modelación realizada en trabajos anteriores. Estos buscaban proponer un modelo de optimización que entregase una ayuda para la planificación de cosechas de uvas en una viña, las cuales tomarán en cuenta tanto los costos operacionales como los costos asociados a la pérdida de calidad de los vinos producto de los diferentes días de cosechas que se escogieran (Mac Cawley et al., 2008).

2.1. Fuentes de variabilidad consideradas

La principal fuente de variabilidad considerada en este trabajo es de los tiempos totales de fermentación. Los motivos del por qué existen estas diferencias en los tiempos de fermentación dependen de diversos factores, como por ejemplo el tipo de uva utilizado, el tipo de vino a producir, las características de las cubas utilizadas para la fermentación, entre otros.

Sin embargo, existe un segundo tipo de factores que afectan a estos tiempos los cuales no son controlables, o por lo menos no totalmente, ya que dependen en su mayoría de factores exógenos. Algunos ejemplos de estos corresponden a la temperatura promedio durante la temporada de cosechas, la presencia de lluvias durante el período de cultivo, la calidad intrínseca de las uvas (la cual es solo conocida con exactitud una vez cosechadas), los niveles de contaminación del aire, entre otros. Producto de estos es que resulta imposible poder predecir con exactitud cuales serán los tiempos de fermentación que las cosechas deberán sufrir, y por ende, la capacidad real de almacenamiento de las bodegas. Esta es la

principal motivación de este trabajo, ya que esta incertidumbre provoca que se deba modificar la planificación inicial realizada para la temporada de cosechas de las uvas, debiendo recurrir a medidas que se encuentran fuera de lo planificado.

2.1.1. Efectos de la variabilidad

Si bien los tiempos de fermentación pueden ser vistos como un dato irrelevante en un primer comienzo, estos tiempos se encuentran fuertemente ligados con las capacidades de recepción de las nuevas cosechas en las bodegas. Este es un punto que se ha de tener en cuenta, en especial para las viñas de mayor tamaño. Dado los grandes volúmenes de cosechas que este tipo de viñas manejan, pequeñas fluctuaciones en los tiempos de fermentación impactan a un mayor número de cosechas, haciendo que los problemas de capacidad sean aún más sensibles a este tipo de factores.

Dado lo anterior, todo el proceso de la planificación de la producción puede ser afectado por este cuello de botella. En particular, en caso de no ser considerado lo anteriormente expuesto, puede darse el caso que no se pueda cumplir con lo que se ha planificado por el simple hecho que algunas de las cosechas han necesitado de un mayor tiempo de fermentación del que se habían previsto inicialmente. Alternativamente se podrían utilizar bodegas externas para la recepción de estas cosechas, algo que se le conoce tradicionalmente como proceso de maquila. Sin embargo, esto conlleva a costos adicionales los cuales tienden a ser mayores que los costos de recibirlos en bodegas propias.

Finalmente, producto de esta postergación obligada de las cosechas, se generarían costos asociados a pérdidas de calidad producto del mayor distanciamiento con las fechas óptimas de cosechas, tal y cómo es descrito de acuerdo a la *función de pérdida de calidad*.

2.1.2. Función de pérdida de calidad

La reducción en la calidad producto de cosechas que son realizadas de manera anticipada o tardía a la fecha óptima establecida puede ser estimada de diferentes maneras. Sin importar cual sea el criterio utilizado para ello, existe un cierto consenso entre los especialistas al indicar la existencia de un cierto deterioro en la calidad de las uvas si es que estas

son cosechadas de manera anticipada. El retrasar las cosechas, si bien no tiene los mismos efectos nocivos en la calidad que el adelantarlas, lleva consigo un riesgo adicional. Este riesgo hace referencia a la posibilidad de que las cosechas puedan verse expuestas a lluvias durante sus períodos finales de cultivo. En la práctica, que las cosechas se enfrenten a tales condiciones climatológicas puede llegar a ser incluso peor para la calidad de éstas que el hecho de adelantar sus puntos de cosechas.

Considerando todo lo anterior, y junto con la ayuda de enólogos expertos, se logró determinar una función de pérdida de calidad. El objetivo de ésta era cuantificar las reducciones en las calidades finales de las uvas de una manera objetiva. Para ello, a cada cuartel se le asignaba un rango de días en los que se considerase óptimo el realizar las cosechas de las uvas, o sea en los días donde la pérdida de calidad fuese nula. A partir de allí se calculaba para el resto de los días que estuviesen dentro de la *ventana de cosecha* el factor de pérdida de calidad que se obtendría si es que la cosecha se realizara aquel día. Este factor en cuestión aumentaba de manera exponencial a mayor número de días se encontrase alejada la cosecha respecto del día óptimo definido.

Una primera formulación fue realizada en el marco del trabajo de Mac Cawley (2002). En éste se utilizó como base el trabajo realizado por Taguchi (1990), al cual se le realizaron ciertas modificaciones. Principalmente el cambio se debió al hecho de que al utilizar una función cuadrática para encontrar el valor para el factor de la pérdida de calidad, se estaba castigando de manera excesivas las desviaciones pequeñas (entre 3 y 8 días), y muy poco a las altas (mayores a 9 días). Considerando lo anterior se formuló la siguiente función:

$$L = e^{|D| \cdot c}$$

Donde:

- L*: Costo asociado a la pérdida de calidad
- D*: Desviación en días respecto al óptimo
- C*: Constante dependiente del tipo de vino

Se consideró la existencia de 4 tipos de vinos: *premium*, *reserva*, *varietal* y *granel*. Cada uno de ellos podría ser vendido a un determinado precio máximo, el cual dependería únicamente si las cosechas fueron realizadas durante su día óptimo. De modo de reflejar las consecuencias en la modificación de los tiempos de las cosechas, se determinó un determinado rango de días a en torno a los cuales las cosechas obtendrían su clasificación de calidad. En ellos, el tipo de vino a obtener dependería exclusivamente de si las uvas fueran cosechadas durante de ese rango de días. Las 3 primeras categorías consideraban que si las uvas eran cosechadas fuera de su rango máximo de días éstas pasaban a la calidad inferior inmediatamente siguiente. Y en caso de que las cosechas estuviesen por fuera incluso del rango de días definidos para el tipo *granel*, las cosechas no poseerían valor alguno.

Los resultados de todo lo anterior se encuentra resumidos en la Tabla 2.1. En ella se establece el valor del precio máximo de venta por kilogramo de uva según la calidad del tipo de vino. Luego, se establece a partir del tipo de vinos *premium*, la cantidad de días necesarios para degradarse a la categoría inmediatamente inferior, junto con el valor asociado a la degradación:

TABLA 2.1. Valores de la degradación del vino. Fuente: Mac Cawley (2002)

Tipo de Vino	Máximo valor por kg. de uva (US)	Días para degradación	Pérdida de valor por kg. de uva (US)
<i>Premium</i>	3.96	0	0
Reserva	2.48	-3 y 3	1.458
Varietal	1.444	-5 y 5	2.63
Granel	0.32	-6 y 6	3.533

Utilizando como base los resultados de la Tabla 2.1 se formuló la siguiente ecuación:

$$L = e^{|D| \cdot 0.295 - 0.5079}$$

No obstante, esta formulación presenta el problema de que se penalizaba de la misma forma el adelantar las cosechas que el retrasarlas, o sea que el castigo era simétrico en torno a la desviación con el día óptimo de cosecha. Esto difería del criterio anteriormente expuesto de los enólogos, en el que señalaba que adelantar las cosechas era notoriamente más nocivo para la calidad de las uvas que el retrasarlas. Para lograr determinar esto con mayor precisión se realizó una encuesta a enólogos de viñas nacionales, en donde se les consultó acerca de la pérdida de calidad de la uva de acuerdo a la desviación medida en días en torno al día óptimo de la cosecha. Estos datos fueron ajustados, construyendo la curva presentada en la ecuación (2.1):

$$y = 0.0111x^4 - 0.1346x^3 - 0.5137x^2 - 0.6091x + 0.9421 \quad (2.1)$$

La Tabla 2.2 presenta el valor de las penalizaciones definidas para cada día desfase.

TABLA 2.2. Factores de penalizaciones de calidad por día de desfase. Fuente: Toloza (2002)

Desviación (días)	Calidad potencial (%)
-7	88
-6	90
-5	92
-4	95
-3	96
-2	98
-1	99
0	100
1	99.9
2	99.8
3	99.7
4	99
5	98
6	96
7	94

Sin embargo, estos datos no alcanzan a abarcar todo el espectro de fechas definidas por las ventanas de cosechas, como tampoco genera una diferencia según el tipo de cepas a la cual estas pertenecen.

De manera general, se establece que lo más temprano que la temporada de cosechas puede iniciarse es con la primera semana de Marzo, culminando a más tardar con la última semana de Mayo. Ante esto, se consultó a un nuevo grupo de expertos los cuales permitieron extender la evaluación de la función de pérdida de calidad y a la vez generar una distinción según el tipo de cepa en cuestión. Estos datos son presentados en la Figura 2.1.2 para las cepas de vinos tintos, y en la Figura 2.1.2 para las cepas de vinos blancos.

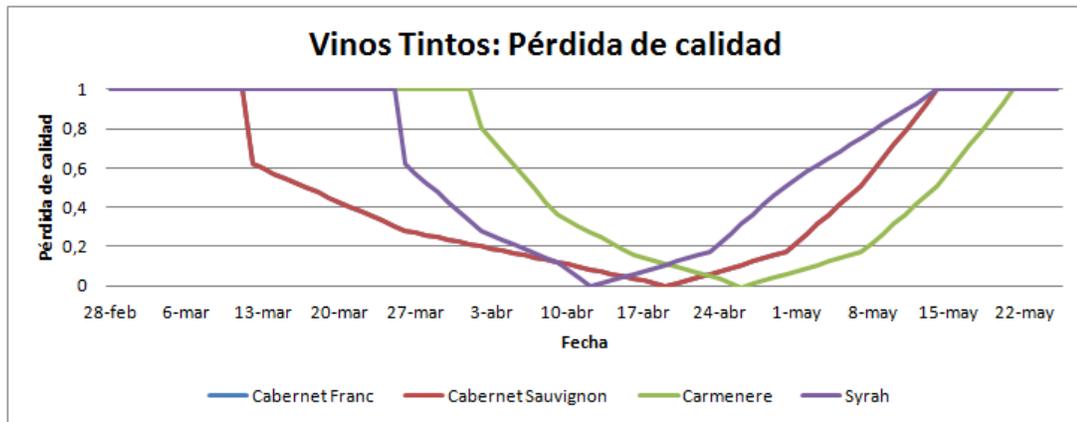


FIGURA 2.1. Vinos Tintos: Pérdida de calidad

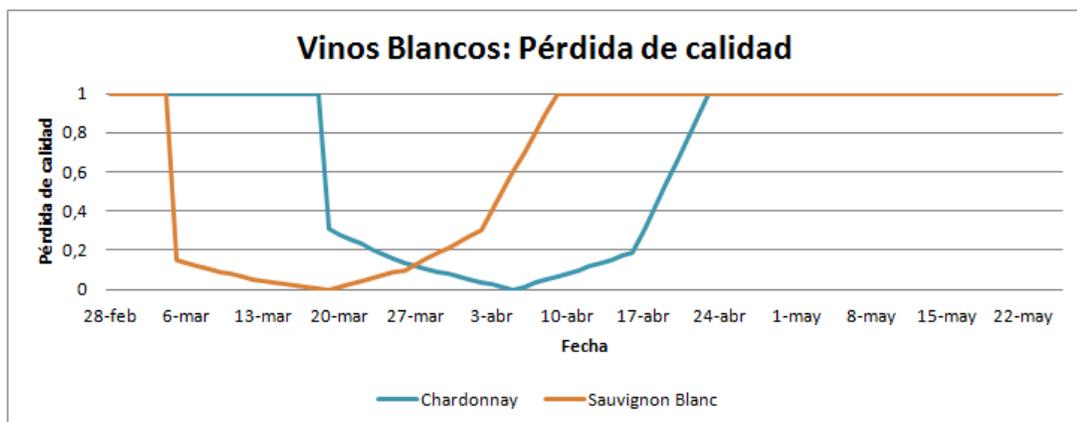


FIGURA 2.2. Vinos Blancos: Pérdida de calidad

2.1.3. Tiempos mínimos, promedios y máximos de fermentación

De acuerdo a información recopilada con diferentes expertos en el tema, se logró determinar los tiempos mínimos, máximos y promedio para los períodos de fermentación según el tipo de vino a producir. Estos datos son presentados en las Tablas 2.3 y 2.4 para los tipos de vino catalogados como tintos y blancos respectivamente.

TABLA 2.3. Vinos Tintos: Tiempos mínimo, promedio y máximo de fermentación según tipo de vino (en días). Fuente: "Entrevista profesor Edmundo Bordeaux (Nov. 2012)"

Tipo de Vino	Tiempo mínimo	Tiempo Promedio	Tiempo máximo
<i>Premium</i>	14	21	28
Reserva	10	14	20
Varietal	6	8	12

TABLA 2.4. Vinos Blancos: Tiempos mínimo, promedio y máximo de fermentación según tipo de vino (en días). Fuente: "Entrevista profesor Edmundo Bordeaux (Nov. 2012)"

Tipo de Vino	Tiempo mínimo	Tiempo Promedio	Tiempo máximo
<i>Premium</i>	14	18	20
Reserva	14	18	20
Varietal	12	14	20

Estos tiempos van aumentando mientras mayor sea la calidad del tipo de vino que se desea producir, en donde los vinos varietal son los considerados como de menor calidad, los vinos reserva como de calidad intermedia y los vinos *premium* como los de mayor calidad. A su vez, según el juicio de los expertos, se asoció una determinada probabilidad a cada uno de estos tipos de vinos, la cual indica la probabilidad de que las cosechas efectivamente terminasen sus períodos de fermentación en los tiempos descritos en las Tablas 2.3 y 2.4. Para el caso de los vinos tintos esta información se resume en la Tabla 2.5.

En base a los a datos mencionados en la Tabla 2.5, se realizó una extrapolación de las probabilidades de modo de obtener valores a nivel diario para cada una de ellas.

TABLA 2.5. Vinos Tintos: Probabilidad de término período fermentación en tiempo mínimo, promedio y máximo. Fuente: "Entrevista profesor Edmundo Bordeaux (Nov. 2012)"

Tipo de Vino	Probabilidad en tiempo mínimo	Probabilidad en tiempo promedio	Probabilidad en tiempo máximo
<i>Premium</i>	10%	60%	30%
Reserva	10%	70%	20%
Varietal	10%	70%	20%

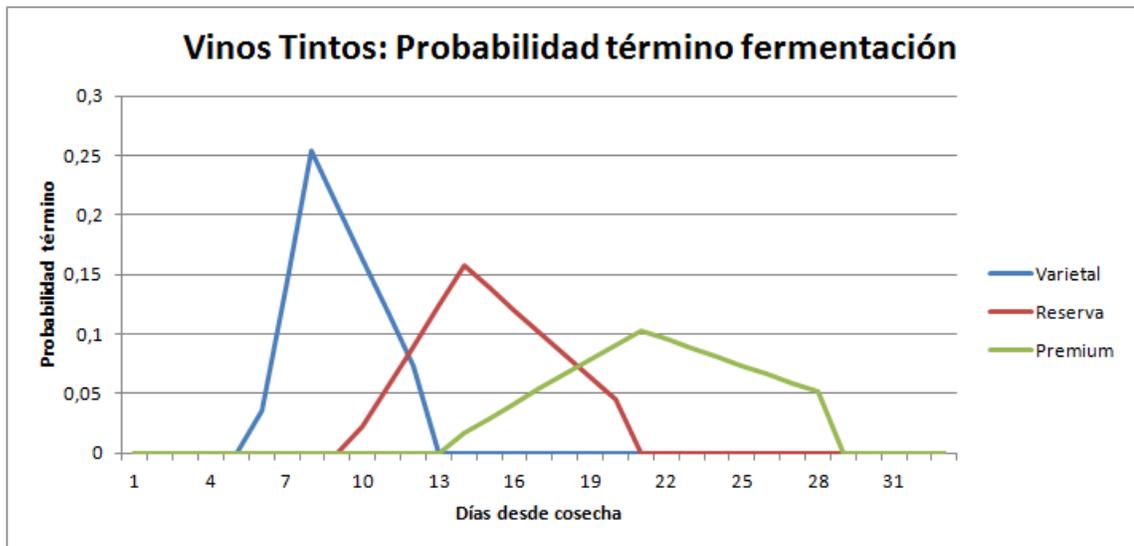


FIGURA 2.3. Vinos Tintos: Probabilidad de término diaria según tipo de vino

Estas probabilidades son entendidas como la probabilidad de que el término del período de fermentación de las cosechas se efectue en los días descritos, medidos a partir del día en que se realizó la cosecha de uvas de alguno de los tipos de vinos descritos. De manera análoga, se obtuvieron los siguientes valores para el caso de los tiempos mínimos, promedio y máximos de cepas de vinos blancos. Estos datos son presentados en la Tabla 2.6.

TABLA 2.6. Vinos Blancos: Probabilidad de término período fermentación en tiempo mínimo, promedio y máximo. Fuente: "Entrevista profesor Edmundo Bordeaux (Nov. 2012)"

Tipo de Vino	Probabilidad en tiempo mínimo	Probabilidad en tiempo Promedio	Probabilidad en tiempo máximo
<i>Premium</i>	10%	65%	25%
Reserva	10%	70%	20%
Varietal	10%	70%	20%

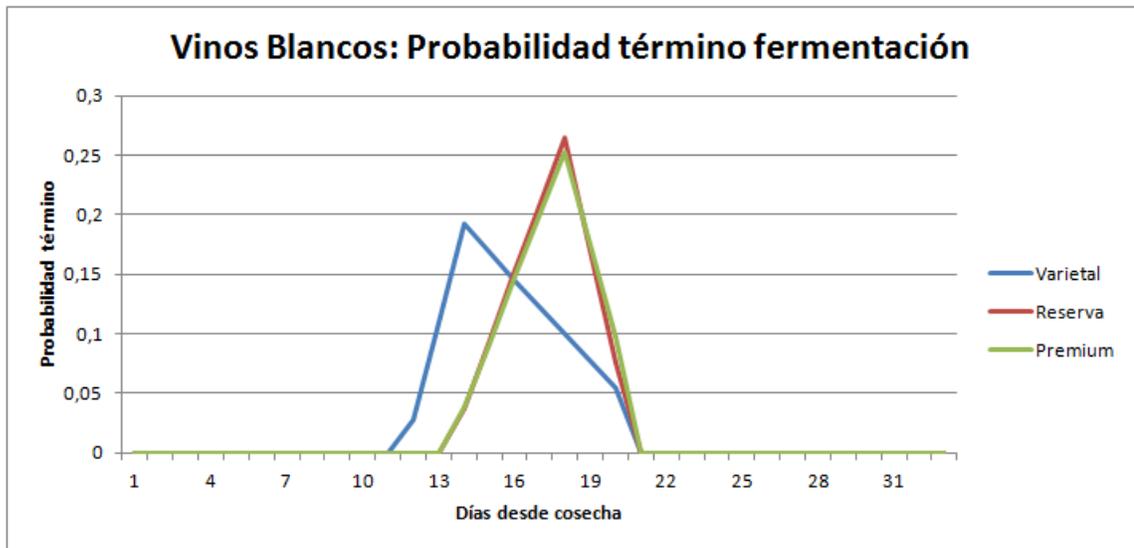


FIGURA 2.4. Vinos Blancos: Probabilidad de término diaria según tipo de vino

Para ambos casos, tanto para los vinos tintos como vinos blancos, las probabilidades de que los tiempos de fermentación se acorten son menores a que los tiempos de fermentación se alarguen. Estos datos fueron recopilados teniendo como base cepas de *Cabernet Franc*, *Cavernet Sauvignon*, *Carmenere* y *Syrah* para los vinos tintos, y cepas de *Chardonay* y *Sauvignon Blanc* para los vinos blancos. Sin pérdida de generalidad, respaldado por el juicio de los expertos, se asumió que dentro de las cepas de vinos tintos, las probabilidades dependían únicamente del tipo de vino a producir y no de la cepa utilizada. De manera análoga, se consideró el mismo supuesto para el caso de las cepas de vinos blancos.

2.1.4. Ventanas de cosecha

Si bien los tiempos de fermentación para los vinos catalogados como blancos y tintos presentaban un comportamiento similar entre sí, en cuanto a la duración de los tiempos de fermentación se refiere, estos sí diferían cuando se analizaban las posibles ventanas de cosecha para cada tipo de cepa. Estas ventanas de cosecha hacen referencia a los períodos en donde los enólogos consideran como factible realizar las cosechas para cada tipo de cepa. En la Tabla 2.7 se presenta un resumen con las fechas a nivel de semana respecto de la fecha mínima, máxima y óptima para poder cosechar cada tipo de cepa. La fecha óptima de cosecha corresponde a las semanas en donde se estima el menor valor respecto de la función pérdida de calidad.

TABLA 2.7. Ventanas extendidas de cosecha según tipo de cepa. Fuente: "Entrevista profesor Edmundo Bordeau (Nov. 2012)"

Tipo de Cepa	Fecha mínima	Fecha óptima	Fecha máxima
<i>Cabernet Franc</i>	Segunda semana Marzo	Tercera semana Abril	Primera semana Mayo
<i>Cavernet Sauvignon</i>	Segunda semana Marzo	Tercera semana Abril	Primera semana Mayo
<i>Carmenere</i>	Primera semana Abril	Cuarta semana Abril	Segunda semana Mayo
<i>Syrah</i>	Cuarta semana Marzo	Segunda semana Abril	Primera semana Mayo
<i>Chardonnay</i>	Tercera semana Marzo	Primera semana Abril	Tercera semana Abril
<i>Sauvignon Blanc</i>	Primera semana Marzo	Fines de segunda y comienzos de tercera semana Marzo	Primera semana Abril

3. MODELACIÓN TIEMPOS DE FERMENTACIÓN

Este capítulo presenta las modelaciones realizadas en trabajos anteriores los cuales han sido la base de la modelación utilizada en este trabajo. Se presentan los supuestos principales, las modificaciones, y la modelación matemática que estas implican. Una vez descrito aquello se describe el modelo utilizado como base en el desarrollo de este trabajo.

3.1. Modelos previos

Mac Cawley construyó un primer modelo para la planificación de las cosechas basándose en los datos de una viña ficticia. En esta se consideraban los diferentes costos operacionales, como también los costos de pérdida de calidad. El objetivo de este trabajo era generar una ayuda en la planificación de cosechas, de modo que esta permitiese observar cuales eran los efectos asociados a la inclusión de ciertos factores.

3.1.1. Modelo Alejandro Mac Cawley

A continuación se presentan extractos de los trabajos de Mac Cawley, Toloza y Bohle respecto de sus tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería en donde se explican conceptos como la función de pérdida de calidad, los principales supuestos de sus modelos, y la modelación matemática de estos. (Ferrer et al., 2008; Bohle et al., 2008). Este modelo se basaba en los siguientes supuestos:

- El día óptimo de cosecha no se puede conocer a ciencia cierta, pero como la generación de escenarios sería de índole combinatorial, se tratará de manera determinística.
- Los costos de contrato y despido son un porcentaje del salario del trabajador.
- Los rendimientos de los trabajadores son iguales entre ellos y no existe aprendizaje, por lo que el valor de su productividad no cambia.
- La disponibilidad de trabajadores es infinita, por lo que el sueldo se mantiene pagado constante.

- La uva no es inventariable, debe ser procesada inmediatamente. Esto debido a que la degradación continúa hasta que la uva es procesada, independiente de cuándo fue cosechada. Así, la solución del problema apunta al día óptimo de procesamiento de la uva.

3.1.2. Modelo Mac Cawley (2002)

De acuerdo a los supuestos planteados, se construyó un modelo matemático que permitiese abordar esta problemática. El modelo matemático utilizado en Mac Cawley (2002) es el siguiente:

(i) Índices

j :	Cuartel $\{1, \dots, T\}$
t :	Período o Fecha $\{1, \dots, T\}$
n :	Desviación con respecto a la fecha óptima $\{1, \dots, k\}$, siendo $k/2$ la fecha óptima.

(ii) Parámetros

F_n :	Penalización por cada kg de uva desplazado en $ n - \lceil \max(k)/2 \rceil $ días con respecto a la fecha óptima $k/2$.
CC_t :	Costo de contrato por trabajador en el período t .
CD_t :	Costo de despido por trabajador en el período t .
CMO_t :	Costo por kg. cosechado de manera manual en el período t .
$Prod_j$:	Productividad de la mano de obra en el cuartel j .
EC_j :	Estimación de producción en kg. para el cuartel j .
$MF_{j,t}$:	$\begin{cases} 1 & \text{si se puede cosechar el cuartel } j \text{ en el día } t \\ 0 & \text{e.o.c} \end{cases}$
PM_j :	Productividad de la máquina cosechadora para el cuartel j .
$KG_Max_{j,t}$:	Kg. máximos a cosechar a máquina en el cuartel j en el período t .

CB_t : Capacidad máxima de recepción de bodega en el período t .
 $MI_{j,t}$: $\begin{cases} 1 & \text{día preferido de cosecha para cada cuartel} \\ 0 & \text{e.o.c} \end{cases}$

(iii) Variables

$B'_{j,t,n}$: $\begin{cases} 1 & \text{si se cosecha el cuartel } j \text{ en el día } t \text{ con amplitud de} \\ & |n - \lceil \max(k)/2 \rceil| \\ 0 & \text{e.o.c} \end{cases}$
 $B_{j,t}$: $\begin{cases} 1 & \text{si se cosecha el cuartel } j \text{ en el día } t \\ 0 & \text{e.o.c} \end{cases}$

MC_t : Número de trabajadores contratados en el día t .

MD_t : Número de trabajadores despedidos en el día t .

$HM_{j,t}$: Horas de máquina cosechadora asignada al cuartel j en el día t .

$MO_{j,t}$: Número de trabajadores asignados a trabajar en el cuartel j , en el día t .

$KG'_{j,t}$: Kg de uva cosechada en el cuartel j en el día t .

$KG'_{j,t}$: Kg de uva cosechada en el cuartel j en el período t con amplitud $|n - \lceil \max(k)/2 \rceil|$.

(iv) Modelo matemático

$$\begin{aligned}
 \min \quad & \underbrace{\sum_{j,t,n} KG'_{j,t,n} \cdot F_{t,n}}_{F1} + \underbrace{\sum_j MC_t \cdot CC_t}_{F2} + \underbrace{\sum_j MD_t \cdot CD_t}_{F3} + \\
 & \underbrace{\sum_{j,t} CM_t \cdot HM_{j,t}}_{F4} + \underbrace{\sum_j CMO_t \cdot Prod_j \cdot MO_{j,t}}_{F5}
 \end{aligned}$$

s.a

$$\sum_t KG_{j,t} = EC_j \quad \forall j \quad (3.1)$$

$$KG_{j,t} \leq MF_{j,t} \cdot B_{j,t} \cdot CB_t \quad \forall j, t \quad (3.2)$$

$$MO_{j,t} \leq MF_{j,t} \cdot B_{j,t} \cdot CB_t \quad \forall j, t \quad (3.3)$$

$$HM_{j,t} \leq MF_{j,t} \cdot B_{j,t} \cdot \frac{KG_{Max_{j,t}}}{PM_j} \quad \forall j, t \quad (3.4)$$

$$KG_{j,t} = MO_{j,t} \cdot Prod_j + HM_{j,t} \cdot PM_j \quad \forall j, t \quad (3.5)$$

$$\sum_j KG_{j,t} \leq CB_t \quad \forall t \quad (3.6)$$

$$B_{j,t} \geq MI_{j,t} \quad \forall j, t \quad (3.7)$$

$$\sum_j MO_{j,t} = MC_t \quad \forall t = 1 \quad (3.8)$$

$$\sum_j MO_{j,t} = \sum_j MO_{j,(t-1)} + MC_t - MD_t \quad \forall t \neq 1, t \neq \max(t) \quad (3.9)$$

$$\sum_j MO_{j,(t-1)} + MC_t - MD_t = 0 \quad t = \max(t) \quad (3.10)$$

$$\sum_n B'_{j,t,n} \leq B_{j,t} \quad \forall j, t \quad (3.11)$$

$$B'_{j,(t+n),n} = MI_{j,t+\lfloor \max(n)/2 \rfloor} \cdot B_{j,(t+n)} \quad \forall j, t \in [1, t - \max(n)] \quad (3.12)$$

$$KG'_{j,t,n} \leq B'_{j,t,n} \cdot M \quad \forall j, t, n \quad (3.13)$$

$$\sum_n KG'_{j,t,n} = KG_{j,t} \quad \forall j, t \quad (3.14)$$

$$KG'_{j,t,n}, KG_{j,t}, MO_{j,t}, MC_t, MD_t, HM_{j,t} \geq 0$$

$$B_{j,t}, B'_{j,t,n} \in \{0, 1\}$$

(v) Términos de la Función objetivo

- F1*: Costo total por pérdida de calidad.
F2: Costos de contratación de personal.
F3: Costos de despido de personal.
F4: Costo de uso de maquinaria.
F5: Costo asociado al trato de la mano de obra.

(vi) Explicación Restricciones

- (3.1): Exige que la totalidad de uvas sean cosechadas.
(3.2): Indican los días con factibilidad de cosecha.
(3.3): Indican los días con asignación de la mano de obra.
(3.4): Indican los días con asignación de maquinaria.
(3.5): Relaciona el total de kg. cosechados con la mano de obra asignada y la maquinaria utilizada.
(3.6): Establece la capacidad máxima de recepción en bodega.
(3.8), (3.9) y (3.10): Balance de mano de obra, junto con la condición que al final todos los trabajadores sean despedidos.
(3.7), (3.11) y (3.12): Incorporan la amplitud con respecto a la fecha óptima de cosecha, a través de la inclusión del n en los subíndices de B .
(3.13) y (3.14): Une la decisión de días de cosecha (B y B') con los Kg. cosechados.

Las principales conclusiones obtenidas a través del modelo planteado fueron que era posible balancear los costos operacionales en conjunto con los costos asociados a la pérdida de calidad de las uvas, los cuales eran modelados de acuerdo a la función de pérdida de calidad. Las planificaciones sugeridas entregaban una reducción de los costos operacionales de un 27% respecto de las planificaciones que eran realizadas de acuerdo al juicio del planificador. Adicionalmente a través de esta planificación se generó una reducción de un 16% en los costos respecto de la utilización de la mano de obra producto de un uso más estable

de estos. Sin embargo, esta modelación fue realizada sin considerar posibles fluctuaciones en sus parámetros.

3.1.3. Modelo Sergio Toloza

A modo de continuación, Toloza construye un nuevo modelo que se basa en el desarrollo realizado en Mac Cawley (2002). Este segundo modelo buscaba incluir dentro de su modelación los costos asociados a los transportes de las cosechas desde los cuarteles hacia las viñas de destino, como también los costos de relocalización del personal entre cuarteles y traslado de maquinarias. El modelo planteado por Sergio Toloza aplica las siguientes modificaciones:

- Se añade distinción de mano de obra contratista y de planta. Además se definen las fechas de contrato y despido
- Se definen cuarteles exclusivos para cosecha manual y para cosecha mecánica.
- Se incluye como restricción que los cuarteles sean cosechados de manera completa.
- Se añade el problema del ruteo óptimo de las operaciones de cosecha. Esto se hace a través de la formulación MTZ del problema del vendedor viajero.
- Se añade la posibilidad de contar con varias bodegas, y se distingue entre capacidad de la bodega para cosecha manual y mecánica, dado que la primera suele realizarse de día mientras que la segunda de noche.
- El modelo asume como dato de entrada la existencia de una estimación robusta de los kilos a cosechar para cada cuartel.
- Existe factibilidad por parte del enólogo para definir ventanas y fechas óptimas de cosecha, con suficientes días de anticipación.
- Existe una función de pérdida de calidad conocida y que está de acuerdo al criterio del enólogo.
- Los trabajadores tienen rendimientos iguales entre sí, y no existe aprendizaje que modifique su productividad en el tiempo.

- El balance entre el costo de operaciones de cosecha y el costo por pérdida de calidad, se hace por medio de un ponderador.

Con ello este modelo logra reflejar la importancia existente al diferenciar los tipos de cosecha entre mecánica y manual, en donde adicionalmente se considerarían los costos de relocalización de las maquinarias y personal de trabajo para llevar a cabo las faenas de cosecha.

3.1.4. Modelo Carlos Bohle

Basandose en los modelos Mac Cawley (2002) y Toloza (2007), el autor Carlos Bohle desarrollo un modelo que permitiece controlar los efectos de la incertidumbre respecto de la productibilidad laboral, las estimaciones de cosecha de cada cuartel y las capacidades máximas de almacenamiento en bodega. Este trabajo fue realizado a modo de continuación del trabajo de Sergio Toloza, en donde el autor Carlos Bohle utiliza como base de su trabajo la formulación realizada en los trabajos de Mac Cawley (2002) y Toloza (2007). Cabe mencionar que a diferencia de los trabajos anteriores, en donde los objetivos de estos eran la minimización de los costos, el enfoque planteado por Bohle apunta hacia la planificación de la temporada de cosechas teniendo como objetivo principal la maximación de utilidades. Las modificaciones realizadas fueron las siguientes:

- Se elimina la distinción entre mano de obra contratista y de planta, así como los días predefinidos para contrato y despido.
- Se modifica la función objetivo, tomando en cuenta ahora el precio promedio de la uva de cada tipo (McCawley 2002) para generar una función de maximización de utilidad. Esto tiene por objetivo representar la restricción de cosecha de cada cuartel como una desigualdad, donde la cantidad cosechada puede ser a lo más igual a la cantidad estimada para cosechar.
- Relacionado con el punto anterior, se elimina el ponderador de la calidad de la uva, puesto que se traspa la pérdida porcentual de calidad al precio, a fin de buscar un balance más real de los costos de cosecha y de calidad. El ajuste de

la estrategia de cosecha que se podía realizar a través de este ponderador ahora depende enteramente del precio que se fije como objetivo como de la función de pérdida de calidad.

El supuesto nuevo más importante es el conocimiento del precio que tiene cada tipo de uva tras el proceso de cosecha. Para esto se dividieron los cuarteles en 4 categorías: *premium*, *reserva*, *varietal* y *granel*. Luego se consideró el precio que tienen los vinos provenientes del viñedo en cada uno de estos segmentos y se le restó el costo asociado al proceso productivo. La unidad de medida fueron las cajas de 12 botellas.

3.1.5. Modelo Bohle (2008)

En base a los supuestos planteado, el modelo matemático utilizado en Bohle (2008) es el siguiente:

(i) Índices

J_1 :	Set de cuarteles cosechables mediante producción manual.
J_2 :	Set de cuarteles cosechables mediante producción mecánica.
J :	Set de cuarteles totales.
J_p :	Set de cuarteles de calidad <i>premium</i> .
J_r :	Set de cuarteles de calidad reserva.
J_v :	Set de cuarteles de calidad varietal.
J_g :	Set de cuarteles de calidad granel.
Mod :	$\begin{cases} 1 & \text{Método de producción manual} \\ 2 & \text{Método de producción mecánico} \end{cases}$
J :	Set de viñedos de destino de las cosechas.
T :	Horizonte de tiempo de la cosecha.

(ii) Parámetros

$D_{i,j}$:	Distancia entre los cuarteles i al cuartel j .
-------------	----------------------------------------------------

$Fact_{j,t}$:	Factor de penalización para las cosechas realizadas durante el día t en el cuartel j .
CC :	Costo de contrato por trabajador.
CD :	Costo de despido por trabajador.
CMO :	Costo unitario de la utilización de la mano de obra contratada.
COc :	Costo de la mano de obra ociosa.
CM :	Costo de utilización de la maquinaria de cosecha.
$P_{j,m}$:	Productividad del método de producción m en el cuartel j .
$EC_{j,v,m}$:	Estimación de uvas a cosechar en el cuartel j , para el método de producción m , para ser enviados a la viña V .
$F_{j,t}$:	$\begin{cases} 1 & \text{si se puede cosechar el cuartel } j \text{ en el día } t \\ 0 & \text{e.o.c} \end{cases}$
$CV_{v,t,m}$:	Capacidad estimada de recepción de cosechas para las bodegas de la viña v , durante el día t , y que fueron realizadas mediante el método de producción m .
DM_{qt} :	Horas disponibles de maquinaria durante el día t .
$MM_{j,t}$:	Cantidad máxima de cosecha mediante método de producción mecánico, en el cuartel j , durante el día t .
M :	Parámetro auxiliar, valor alto.
Min_m :	Cantidad mínima de cosecha mediante método de producción m , para cualquier día.
pi so:	Mínimo de trabajadores a contratar.
pp :	Precio de la uva de calidad <i>premium</i> .
pr :	Precio de la uva de calidad reserva.
pv :	Precio de la uva de calidad varietal.
pg :	Precio de la uva de calidad granel.
CR :	Costo de relocalización de actividades de cosecha.

(iii) Variables

$$z_{t,i,j,v} : \begin{cases} 1 & \text{si se activa el camino entre } i \text{ y } j, \text{ durante el día } t, \text{ para la viña } v. \\ 0 & \text{e.o.c} \end{cases}$$

$\tau_{t,j,v}$: Variable de eliminación de *subtours* en el problema del vendedor viajero.

$$v_{t,j,m} : \begin{cases} 1 & \text{si hay vendimia en el cuartel } j, \text{ durante el día } t, \text{ mediante el} \\ & \text{método de producción } m. \\ 0 & \text{e.o.c} \end{cases}$$

$$y_{j,t,v,m} : \begin{cases} 1 & \text{si se activa la cosecha en el cuartel } j, \text{ durante el día } t, \\ & \text{mediante el método de producción } m, \text{ para ser enviados a} \\ & \text{la viña } v. \\ 0 & \text{e.o.c} \end{cases}$$

$kg_{j,t,v,m}$: kilos cosechados en el cuartel j , durante el día t , mediante el método de producción m y para ser enviados a la viña v .

NC_t : Número de trabajadores contratados durante el día t .

ND_t : Número de trabajadores despedidos durante el día t .

$N_{j,t}$: Número de trabajadores asignados al cuartel j durante el día t .

$MA_{j,t}$: Horas de maquinaria asignadas al cuartel j durante el día t .

(iv) Modelo matemático

$$\begin{aligned}
\max \quad & \underbrace{\sum_{t,j \in J_p, v, m} (1 - Fact_{j,t}) \cdot pp \cdot kg_{t,j,v,m}}_{F1} + \underbrace{\sum_{t,j \in J_r, v, m} (1 - Fact_{j,t}) \cdot pr \cdot kg_{t,j,v,m}}_{F2} + \\
& \underbrace{\sum_{t,j \in J_v, v, m} (1 - Fact_{j,t}) \cdot pv \cdot kg_{t,j,v,m}}_{F3} + \underbrace{\sum_{t,j \in J_g, v, m} (1 - Fact_{j,t}) \cdot pg \cdot kg_{t,j,v,m}}_{F4} \\
& - \underbrace{\sum_{t,j \in J1, / \sum_v EC_{j,v,1} \neq 0} CMO \cdot N_{t,j}}_{F5} - \underbrace{\sum_t COc \cdot N_{t,ag'}}_{F6} - \\
& \underbrace{\sum_t (CC \cdot NC_t + CD \cdot ND_t)}_{F7} + \underbrace{\sum_{t,j \in J2 / \sum_v EC_{j,v,2}} CM \cdot MA_{t,j}}_{F8} - \\
& \underbrace{\sum_{t,i,j,v / i \neq j} D_{i,j} \cdot CR \cdot z_{t,i,j,v}}_{F9}
\end{aligned}$$

s.a

$$\sum_{t:F_{j,t} \neq 0} kg_{t,j,v,m} \leq CV_{v,t,m} \quad \forall v, m \quad (3.15)$$

$$\sum_{t:F_{j,t} \neq 0} kg_{t,j,v,m} \leq EC_{j,v,m} \quad \forall j, v, m \quad (3.16)$$

$$kg_{t,j,v,m} \leq y_{t,j,v,m} \cdot CV_{v,t,m} \quad \forall j, t, v, m : F_{j,t} \neq 0 \quad (3.17)$$

$$kg_{t,j,v,m} \leq Min_m \cdot y_{t,j,v,m} \quad \forall j, t, v, m : F_{j,t} \neq 0 \quad (3.18)$$

$$\sum_v y_{t,j,v,m} \leq M \cdot v_{t,j,m} \quad \forall j, t, m : F_{j,t} \neq 0 \quad (3.19)$$

$$v_{t,j,m} \leq \sum_v y_{t,j,v,m} \quad \forall j, t, m : F_{j,t} \neq 0 \quad (3.20)$$

$$\sum_{t,m:F_{j,t} \neq 0} v_{t,j,m} \geq 1 \quad \forall j : \sum_{v,m} EC_{j,v,m} \neq 0 \quad (3.21)$$

$$y_{t,j,v,m} \leq F_{j,t} \quad \forall t, j, v, m \quad (3.22)$$

$$\sum_v kg_{t,j,v,1} \leq N_{t,j} \cdot P_{j,1} \quad \forall t, j \in J1 \quad (3.23)$$

$$\sum_{j \in J1} N_{j,t} = \sum_{j \in J1} N_{j,t-1} + NC_t - ND_t \quad \forall t : \sum_{j \in J1} F_{j,t} \neq 0 \quad (3.24)$$

$$N_{t,j} \geq \text{piso} \cdot v_{t,j,1} \quad \forall t, j \in J1 \quad (3.25)$$

$$N_{t,j} \geq M \cdot \sum_v y_{t,j,v,1} \quad \forall t, j \in J1 \quad (3.26)$$

$$\sum_v kg_{t,j,v,2} \leq MA_{t,j} \cdot P_{j,2} \quad \forall t, j \in J2 \quad (3.27)$$

$$\sum_{j \in J2} MA_{t,j} \leq DMq_t \quad \forall t \quad (3.28)$$

$$MA_{t,j} \leq M \cdot \sum_v y_{t,j,v,m} \quad \forall t, m, j \in J2 \quad (3.29)$$

$$\tau_{j,t,v} \geq \tau_{i,t,v} + 1 - \text{card}(J) \cdot (1 - z_{t,i,j,v}) \quad \forall t, i, j, v : i \neq j, \\ EC_{j,v,2} \neq 0, EC_{i,v,2} \neq 0 \quad (3.30)$$

$$\sum_{j: F_{j,t} \neq 0, i \neq j} z_{t,j,i,v} \geq y_{t,i,v,2} \quad \forall t, i, v, m : F_{i,t} \neq 0 \quad (3.31)$$

$$\sum_{j: F_{j,t} \neq 0, i \neq j} z_{t,j,i,v} \geq y_{t,i,v,2} \quad \forall t, i, v, m : F_{i,t} \neq 0 \quad (3.32)$$

$$\tau_{ag'tv} = 1 \quad \forall t, v \quad (3.33)$$

$$2 \leq \tau_{j,t,v} \leq \text{card}(J) \quad \forall t, j, v : EC_{j,v} \neq 0 \quad (3.34)$$

$$z_{t,i,j,v}, y_{t,j,v,m}, v_{t,j,m} \in \{0, 1\}$$

$$N_{t,j}, \tau_{j,t,v} \in N_0^+$$

$$NC_t, ND_t, MA_{j,t}, kg_{t,j,v,m} \geq 0$$

(v) Explicación términos función objetivo

- $F1$: Ingresos percibidos por cosechas de uvas *premium* descontando efectos de pérdida de calidad.
- $F2$: Ingresos percibidos por cosechas de uvas reserva descontando efectos de pérdida de calidad.
- $F3$: Ingresos percibidos por cosechas de uvas varietal descontando efectos de pérdida de calidad.
- $F4$: Ingresos percibidos por cosechas de uvas granel descontando efectos de pérdida de calidad.
- $F5$: Costos de utilización de mano de obra.
- $F6$: Costos de mantención de mano de obra ociosa.
- $F7$: Costos de contratación y despido de mano de obra.
- $F8$: Costos de utilización de maquinaria.
- $F9$: Costos de relocalización.

(vi) Explicación Restricciones

- (3.15): No se puede superar la capacidad máxima de la bodega de destino de las cosechas.
- (3.16): No se puede cosechar más de lo estimado para la viña v , en el cuartel j , mediante el método de producción m .
- (3.17): No se puede cosechar sin antes activar las cosechas a través de la variable y .
- (3.18): Para cosechar, se debe cosechar al menos un mínimo Min_m .
- (3.19): Para cativar la cosecha de una determinada viña, se debe activar la cosecha para aquel cuartel.
- (3.20): Se debe asignar una viña de destino, antes de poder realizar una cosecha en el cuartel.

- (3.21): Todos los cuarteles han de ser cosechados.
- (3.22): Solo se cosecharán los cuarteles durante sus períodos factibles.
- (3.23): La cantidad a cosechar no puede superar la productividad de la mano de obra asignada.
- (3.24): La cantidad de trabajadores en el tiempo debe ser consistente a las cantidades contratadas y despedidas.
- (3.25): Asegura un piso mínimo de trabajadores contratados.
- (3.26): No se contratarán trabajadores en caso de no haber cosechas en ningún cuartel.
- (3.27): Se asignan las horas necesarias de maquinaria para realizar las cosechas mecánicas.
- (3.28): Se limita la cantidad máxima de horas de maquinaria asignadas.
- (3.29): Solo se asignan horas de maquinaria en días donde existen cosechas.
- (3.30): Se eliminan los subcircuitos.
- (3.31): Si un cuartel es cosechado, las operaciones de cosecha deben dirigirse a otro.
- (3.32): Si un cuartel es cosechado, las operaciones de cosecha deben provenir de otro.
- (3.33): Se inicializa como lugar de partida de las cosechas el centro de operaciones.
- (3.34): Se establece el orden ascendente de cuarteles a cosechar.

3.2. Modelación caso base

Para el desarrollo del modelo final de este trabajo se decidió utilizar como base el modelo implementado en el trabajo de Carlos Bohle. En base a éste, se añaden ciertas consideraciones a modo de analizar las nuevas problemáticas que se desean abordar, en particular la incorporación de los tiempos de fermentación de las cosechas. Para ello fue

necesario realizar ciertos supuestos, los cuales logran simplificar ciertos aspectos de la realidad de los procesos de la producción de vinos, ya que de otro modo, implicarían un complejo desarrollo matemático el cual no aportaría mayor valor al modelo en comparación a la complejidad adicional que el modelo adquiriría. De esta forma, el modelo utilizado incorpora las mismas consideraciones planteadas en el modelo de Carlos Bohle respecto de los trabajos de Mac Cawley (2002) y Toloza (2007), pero se adicionan las siguientes modificaciones:

- Se incluyen restricciones para la inclusión de los tiempos de fermentación de las cosechas en bodega. Se realiza una distinción entre los tiempos de fermentación para cada tipo de uva, en donde se incluyen las probabilidades de término del período de fermentación para cada día según el día que se haya efectuado la cosecha. Estas probabilidades dependen exclusivamente del tipo de uva que se haya cosechado y del día en que se vaya a realizar la cosecha.
- Los tiempos de fermentación son modelados a través de un parámetro $\alpha_{t,v,k,j}$ como la probabilidad de que las cosechas realizadas durante el día t , para ser enviadas a la viña v , finalizarán su período de fermentación en el día k . Y esto es visto según el cuartel j de donde fueron realizadas las cosechas.
- Se incluyen los tiempos de desfase, los cuales corresponde al tiempo de retardo existente entre el día en que fueron realizadas las cosechas, hasta el primer día en que podría haber finalizado el periodo de fermentación de estas. Estos tiempos varían según el tipo y calidad de uva.
- Se incluyen restricciones para el manejo de la capacidad de inventario en cada período. Esta restricción revisa que para cada bodega, y en cada período de tiempo, la cantidad total de las cosechas realizada hasta ese momento, menos la cantidad de cosechas que han terminado sus períodos de fermentación, sea inferior a la capacidad total de la bodega. A modo de simplificación de la modelación se consideró la capacidad en cada bodega de manera conjunta, sin realizar distinción según el tipo de uva.

- No se pueden almacenar cosechas en las bodegas sin enviarlas directamente a sus procesos de fermentación. Con ello, solo se puede cosechar según la disponibilidad para enviar uvas a sus procesos de fermentación en las bodegas.
- Se amplía el horizonte de tiempo de 18 a 77 días, de modo de poder observar los efectos de la inclusión de los tiempos de fermentación dentro de una temporada completa de cosecha.
- Se amplían las ventanas de cosecha según cada tipo de cepa.
- Se incluyen los valores a la función de pérdida de calidad para los días adicionales que se consideran en la ventana de cosecha. Se diferencia según tipo de cepa.
- Se flexibiliza la restricción que exigía cosechar todos los cuarteles, se la limita a que la cosecha no pueda exceder la estimación máxima de uvas de cada cuartel.
- Se añade restricción de cumplimiento de una cuota mínima de cosecha para cada tipo de cepa durante todo el horizonte de tiempo.
- Se asume sin pérdida de generalidad que la cosecha de cada tipo de uva se realizará exclusivamente para la satisfacción de la demanda de ese tipo de uva y no de los tipos inferiores. En otras palabras, al cosechar uva del tipo *premium* será para satisfacer la demanda de uva *premium* y no de las categorías inferiores. De manera análoga se realiza esto para el resto de las categorías de uvas.
- Cada cuartel j produce un único tipo de cepa de una determinada calidad. Con ello el precio máximo de las cosechas queda definido únicamente por el cuartel en donde estas fueron realizadas.
- Para todo período de tiempo existirá la posibilidad de enviar las cosechas a una bodega externa a los de la viña. Este envío se realizará a un costo ostensiblemente superior al que si se enviase hacia algunas de las bodegas de las viñas propias.

El principal cambio realizado es la inclusión de los tiempos de fermentación para las cosechas que se encuentran en bodega. Con ello ahora la capacidad de bodega ya no será

un valor fijo para cada período, si no que dependerá de las cosechas que se hayan realizado antes, y de las uvas que aún no hayan finalizado su período de fermentación. Esto conducirá un cambio significativo en la forma en como se debe abordar este problema, ya que ahora se deberá tener en cuenta que planificar un alto volumen de cosecha para un determinado período estará limitando las posibilidades de cosecha de los períodos siguientes. Esto implicaría que hasta que no haya finalizado el período de fermentación de las cosechas ya realizadas, no existirá capacidad disponible en las bodegas para poder recibir nuevas cosechas, generando un cuello de botella para toda la cadena productiva. Junto con esto se ha ampliado el horizonte de tiempo considerado en la modelación, en donde de esta manera se abarca el horizonte completo de una temporada de cosechas para una viña que realice las cosechas de las cepas anteriormente mencionadas. Finalmente la inclusión de una bodega externa con capacidad ilimitada garantizará que siempre existirá la posibilidad de enviar las cosechas a esta bodega, pero a un precio considerablemente mayor que el de utilizar las bodegas propias. Aquello evitará que al momento de introducir las variaciones en los parámetros sujetos a incertidumbre se puedan generar escenarios en los cuales no exista solución.

3.2.1. Formulación modelo nominal

De acuerdo a las consideraciones realizadas en la Sección 3.2, el modelo planteado como caso base en la resolución de este trabajo se le denominará como *modelo nominal*, en donde la formulación utilizada es la siguiente:

(i) Índices

j :	Cuartel $\{1, \dots, 97\}$
t :	Período o Fecha $\{1, \dots, 77\}$
p :	Método de producción $\{MA, ME\}$.
c :	Tipo de cepa $\{CF, CS, SY, Ca, SB, Ch\}$
v :	Viña de destino cosechas $\{B1, B2, EXT\}$
i :	Número de iteración $\{1, \dots, I\}$

(ii)

Subconjuntos

$J_p \subseteq J$ Conjunto de cuarteles que pueden ser cosechados mediante el método de producción p .

$J_c \subseteq J$ Conjunto de cuarteles que tienen cepas de uva c .

(iii) Parámetros

P_j Precio de venta por Kg. de uva cosechado en el cuartel j .

$F_{j,t}$ Factor penalización por cosechar el día t , el cuartel j .

CC Costo de contratación unitario por trabajador.

CD Costo de despido unitario por trabajador.

CM Costo por hora del uso de máquinas.

CMO Costo diario unitario por trabajador.

BE Costo por kg. de enviar a bodega externa, *costo maquila*.

PT_j Productividad de cosecha diaria por trabajador en kg.

PM_j Productividad de cosecha por hora en kg. por maquina.

$EC_{p,j}$ Estimación de cosecha manual en el cuartel j , mediante el método de producción p .

$D_{p,c}$ Demanda por tipo de cepas c mediante método de producción p .

$FA_{j,t} \begin{cases} 1 & \text{si el cuartel } j \text{ puede ser cosechado en el día } t \\ 0 & \text{e.o.c} \end{cases}$

CV_v Capacidad de recepción máxima de las bodegas en la viña v .

HDM_t Cantidad de horas máxima de utilización de maquinas durante el día t .

M Valor de M grande.

MC_p Cantidad mínima a cosechar mediante método de producción manual, en caso de cosechar manualmente algún cuartel un día.

MT	Cantidad mínima de trabajadores a asignar a un cuartel, en caso de cosechar manualmente algún cuartel un día.
$\alpha_{k,v,t,j}$	Valor esperado de la probabilidad de que las cosechas realizadas en el cuartel j , durante el día t , y que son enviadas a la viña v , terminen su período de fermentación durante el día k .
P_j	Precio esperado de venta por kg. de las cosechas del cuartel j si estas fueron cosechadas en su día óptimo.

(iv) Variables

$V_{p,j,t}$	$\begin{cases} 1 & \text{si se realizó cosechas mediante el método de producción } p, \\ & \text{en el cuartel } j, \text{ durante el día } t. \\ 0 & \text{e.o.c} \end{cases}$
$R_{p,t,j,v}$	$\begin{cases} 1 & \text{si a la viña } v \text{ se le envían cosechas realizadas mediante el} \\ & \text{método de producción } p, \text{ en el cuartel } j, \text{ durante el día } t. \\ 0 & \text{e.o.c} \end{cases}$
$X_{p,t,j,v}$	Cantidad de kilos cosechados mediante el método de producción p , durante el día t , en el cuartel j para ser enviados a la viña v .
NC_t	Cantidad de trabajadores contratados durante el día t .
ND_t	Cantidad de trabajadores despedidos durante el día t .
$MA_{t,j}$	Cantidad de horas de máquina asignadas para el día t , al cuartel j .
$N_{t,j}$	Cantidad de trabajadores asignados durante el día t , al cuartel j .

(v) Modelo Matemático

$$\begin{aligned}
 \max \quad & \underbrace{\sum_{t,j,p,v} (1 - F_{j,t}) \cdot P_j X_{p,t,j,v}}_{F1} - \underbrace{\sum_{t,j,p} BE \cdot X_{p,t,j,EX}}_{F2} \\
 & - \underbrace{\sum_{t,j} CMO \cdot N_{t,j}}_{F3} - \underbrace{\sum_{t,j} CM \cdot MA_{t,j}}_{F4} - \underbrace{\sum_t CC \cdot NC_t}_{F5} \\
 & \quad \quad \quad - \underbrace{\sum_t CD \cdot ND_t}_{F6}
 \end{aligned}$$

s.a

$$\sum_j X_{p,t,j,v} \leq CV_{p,v} \quad \forall p, t, v \quad (3.35)$$

$$\sum_{t,v} X_{p,t,j,v} \leq EC_{p,j} \quad \forall p, j \quad (3.36)$$

$$\sum_{t,v,j \in J_c} X_{p,t,j,v} \geq D_{p,c} \quad \forall p, c \quad (3.37)$$

$$X_{p,t,j,v} \geq MC_p \cdot R_{p,t,j,v} \quad \forall p, t, v, J \in J_{MA} \quad (3.38)$$

$$\sum_v R_{p,t,j,v} \leq M \cdot V_{p,t,j} \quad \forall p, t, j \quad (3.39)$$

$$V_{p,t,j} \leq \sum_v R_{p,t,j,v} \quad \forall p, t, j \quad (3.40)$$

$$\sum_{p,t} V_{p,t,j} \geq 1 \quad \forall j : EC_{MA,j} + EC_{ME,j} \neq 0 \quad (3.41)$$

$$R_{p,t,j,v} \leq FA_{j,t} \quad \forall p, t, j, v \quad (3.42)$$

$$\sum_v X_{MA,t,j,v} \leq N_{t,j} \cdot PT_j \quad \forall t, j \in J_{MA} \quad (3.43)$$

$$\sum_{j \in J_{MA}} N_{t,j} = \sum_{j \in J_{MA}} N_{t-1,j} + NC_t - ND_t \quad \forall t \geq 2 \quad (3.44)$$

$$N_{t,j} \geq MT \cdot V_{MA,t,j} \quad \forall t, j \quad (3.45)$$

$$\sum_v X_{ME,t,j,v} \leq MA_{t,j} \cdot PM_t \quad t, j \in J_{ME} \quad (3.46)$$

$$\sum_j MA_{t,j} \leq HDM_t \quad \forall t \quad (3.47)$$

$$\sum_{p,j,n \leq t} (1 - \sum_{k \leq t} \alpha_{k,v,n,j}) \cdot X_{p,n,j,v} \leq CV_v \quad \forall v, t \quad (3.48)$$

$$V_{p,t,j}, R_{p,t,j,v} \in \{0, 1\}$$

$$NC_t, ND_t, MA_{t,j}, N_{t,j} \geq 0$$

(vi) Términos de la función objetivo

- | | |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>F1</i> | Ingresos percibidos por cosechas aplicando descuento según función de pérdida de calidad. |
| <i>F2</i> | Costos por envíos de cosechas a bodega externa. |
| <i>F3</i> | Costos por el uso de mano de obra. |
| <i>F4</i> | Costos por uso de maquinaria. |
| <i>F5</i> | Costos por concepto de contratación de trabajadores. |
| <i>F6</i> | Costos por concepto de despido de trabajadores. |

(vii) Explicación Restricciones

- Restricciones de asignación de capacidades y volumen:

(3.35) La cantidad cosechada diaria no debe exceder a la capacidad de la bodega de destino.

(3.36) La cantidad cosechada en cada método de producción no puede exceder la cantidad disponible estimada en cada en el cuartel.

- (3.37) La cantidad cosechada de cada tipo de cepa debe superar al menos la demanda mínima exigida.
- (3.38) Para cosechar manualmente un cuartel se debe superar una cantidad mínima de cosecha.
- (3.39) Control de asignación de viñas, sólo se envía cosecha a viñedos si se cosecha el cuartel.
- (3.40) Repetición del control, ahora se busca evitar que *vend* sea un vector de 1.
- (3.41) Todo cuartel con estimación positiva de cosechas debe ser cosechado.
- (3.42) Exigencia que todo cuartel deba ser cosechado.

- Restricciones de asignación de cosecha manual:

- (3.43) Controla que la cosecha asignada no exceda la productividad de los trabajadores.
- (3.44) Controla la continuidad en la cantidad de mano de obra.
- (3.45) Controla que en caso de cosechar un cuartel, se le asigne al menos la cantidad mínima de trabajadores.

- Restricciones de asignación de cosecha mecánica:

- (3.46) Controla que la cosecha asignada no exceda la capacidad de la maquinaria.
- (3.47) Controla que no se asigne más maquinaria que la disponible.

- Restricciones de inventario:

- (3.48) Controla que para cada período, la cantidad cosechada realizadas hasta esa fecha y que aún no han finalizado sus períodos de fermentación, sean inferiores a la capacidad de la bodega de destino.

Los resultados de este *modelo nominal* (MN) serán utilizados como punto de referencia para medirán los efectos de la inclusión de la incertidumbre en los tiempos de fermentación. Esto se realizará mediante una modelación aplicando técnicas de optimización robusta a las restricciones de las capacidades de bodega.

Los datos utilizados en este trabajo fueron proporcionados por la viña *Haras de Pirque*, en donde se buscará presentar resultados que puedan compararse contra las decisiones reales de una viña productora de vinos. Sin embargo, por temas de confidencialidad se ha solicitado que estos datos sean enmascarados en la publicación de resultados.

3.3. Evaluación inclusión tiempos de fermentación

Para analizar la importancia que involucra la inclusión de los tiempos de fermentación, primero se debe plantear un modelo que permita comparar de manera equitativa los resultados que se obtendrían en ambos casos. Para ello, a partir del MN se desprende una variación del mismo que será denominado como *modelo sin fermentación*.

3.3.1. Modelo sin fermentación

El *modelo sin fermentación* (MSF) utiliza como base el modelo propuesto para el MN, en donde la única diferencia relevante es la omisión de la restricción asociada a los tiempos de fermentación (3.48). Esta restricción es reemplazada por una restricción análoga a la utilizada en el modelo propuesto por Bohle en la Sección 3.1.5, específicamente por la siguiente restricción:

$$\sum_j X_{p,t,j,v} \leq CV_v \quad \forall t, v \quad (3.49)$$

Esta restricción es vista como la cantidad máxima a cosechar y ser enviada a una determinada bodega, no puede superar el valor definido acerca de su capacidad máxima por el parámetro CV_v . Adicionalmente, esta restricción es contemplada para cada uno de los días factibles de cosecha.

Ambos modelos, MSF y MN, permitirán realizar un análisis equitativo respecto de lo que significa la inclusión de los tiempos de fermentación. En una primera instancia, se analizarán los resultados al considerar tiempos determinísticos para los tiempos de fermentación. Una vez determinado aquello, se procederá a analizar los efectos ocasionados por la incertidumbre existente en estos tiempos. Con ello se espera demostrar que la inclusión de los tiempos de fermentación implican un cambio significativo en la estructura de las soluciones, y a su vez resaltar la importancia acerca de utilizar algún tipo de protección respecto de esta fuente de incertidumbre.

3.3.2. Comparación resultados MSF y MN en escenario determinístico

Asumiendo la existencia de tiempos de fermentación como si se tratase de un parámetro determinístico, en la Tabla 3.1 se comparan las utilidades indicadas en la función objetivo según la solución propuesta por cada modelo:

TABLA 3.1. Valores función objetivo MSF vs MN

Modelo utilizado	Valor función objetivo
MSF	560.511
MN	513.711

Se puede observar que el MSF entrega utilidades superiores a las del MN. Esta diferencia existe producto de los mayores costos operacionales y costos de pérdida de calidad que presenta la solución del MN. Estos costos son presentados en la Tabla 3.2.

TABLA 3.2. Valores costos operacionales y costos pérdida calidad MSF vs MN

Modelo utilizado	Costos operacionales	Costos pérdida de calidad
MSF	257.947	8.852
MN	290.194	23.292

La diferencia en estos costos es ocasionada producto de la estructura de solución propuesta por cada modelo. En la Figura 3.3.2 se presenta el total de cosechas planificadas por día, según el modelo utilizado. Al comparar en detalle la estructura de las soluciones propuestas por cada modelo respecto de las cosechas a realizar en cada uno de los cuarteles, se observó que en el MSF las cosechas planificadas se concentran principalmente en los días óptimos de cosecha, esto según del tipo de cepas que el cuartel dispusiese. En cambio, en las soluciones del MN se observó un cierto suavizamiento respecto de las cantidades cosechadas en torno a estas mismas fechas.

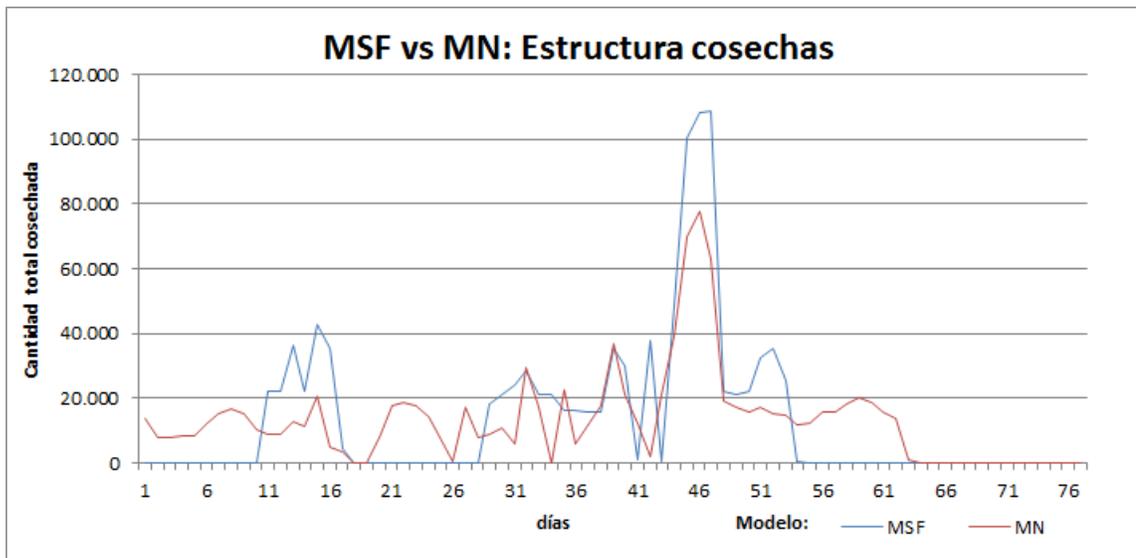


FIGURA 3.1. Graficos cosechas totales por día según modelo

Producto de aquello, el MSF permite utilizar de una manera más eficiente los recursos disponibles. Esto es reflejado en una reducción de los costos operacionales, y a la vez en unos menores costos de pérdida de calidad producto de cosechas más cercanas a sus días óptimos. Sin embargo, al no considerar los tiempos de fermentación, el MSF interpreta que las capacidades de las bodegas son independiente de las cosechas realizadas en los días previos. Para este modelo, lo únicamente importante es que la cantidad total cosechada en cada día no supere la capacidad máxima de las bodegas, logrando la reducción en la estructura de costos anteriormente mencionada. No obstante, esta reducción es realizada a

expensas de posibles problemas con la capacidad, generando un nuevo tipo de costos que mas adelante se detallarán.

Caso contrario a lo que sucede en la modelación de la capacidad del MN, en donde la capacidad es vista como si se tratase de un problema de flujo de inventario con restricciones de capacidad. En éste, las capacidades están relacionadas directamente con las cantidades cosechadas durante ese mismo día, pero también de lo cosechado en los días previos. La planificación de este modelo considera que a medida que las cosechas finalizan sus períodos de fermentación, es cuando se va liberando la capacidad en las bodegas, y así se posibilita la recepción de nuevas cosechas. Lo anterior se traduce en una planificación más conservadora, en donde estas limitaciones de la capacidad obligan a que se deban reagendar las cosechas hacia el resto de los días, y no una concentración en torno a los días óptimos como se pudiese querer. Con ello, esta planificación debe incurrir en unos mayores costos operacionales y costos de pérdida de calidad, pero con la idea de que estos sean compensados al evitar los posibles problemas de capacidad.

Siguiendo el planteamiento anterior, al no considerar los tiempos de fermentación - tal como lo realiza el MSF-, se estarán consistentemente sobreestimando las capacidades de almacenamiento de las bodegas. Por lo cual, al seguir la planificación indicada por el MSF, existe una probabilidad cierta de se generen situaciones en donde las capacidades de las bodegas se vean sobrepasadas. Al suceder aquello, se deberá recurrir a bodegas externas que puedan hacerse cargo del proceso de fermentación de estas, generándose los consecuentes *costos de maquila*, entre otros.

A estos costos generados producto de la infactibilidad de las soluciones se les llamarán *costos de infactibilidad*, los cuales permitirán evaluar de una manera más completa las soluciones de cada modelo. Cabe mencionar que los excesos anteriormente mencionados suceden por el hecho de que al no considerar los tiempos de fermentación en la modelación misma del problema, se estará consistentemente sobrepasando la capacidad de las bodegas. Esto ya que para cada período de tiempo, se planificarían las cosechas como si se dispusiese de la capacidad completa de las bodegas, algo que en la realidad no es cierto.

TABLA 3.3. Beneficios totales MSF vs MN sin incertidumbre

Modelo utilizado	Costos infactibilidad	Beneficios totales
MSF	118.641	441.870
MN	0	513.711

De la Tabla 3.3 se puede observar que al considerar los *costos de infactibilidad*, los beneficios del MN superan en un 16,2% los beneficios del MSF. Por lo cual, si bien en un comienzo la solución propuesta por el MN pareciera ser como la más eficiente, al entrar en consideración los *costos de infactibilidad* se demuestra que era necesario la inclusión de los tiempos de fermentación. Sin embargo, tal como fue planteado en la Sección 2.1.3 de este trabajo, los tiempos de fermentación presentan una incertidumbre propia de cualquier proceso natural. Con lo cual existe una probabilidad real que incluso las soluciones propuestas por el MN presenten *costos de infactibilidad*.

A modo de medir estos costos, se realizó una simulación en donde se generaron 100 escenarios para distintos valores de los tiempos de fermentación. Se asumió que las probabilidades de finalización de los tiempos de fermentación, vistos desde cada cuartel, tienen un valor promedio el cual dependen del tipo de cepa y calidad de las uvas. Estos valores son los mismos que los descritos en las Tablas 2.3 y 2.4, en donde mediante una distribución uniforme se asume que estos pueden variar hasta un 50% de su valor original.

TABLA 3.4. Beneficios totales MSF vs MN con incertidumbre

Modelo utilizado	Costos infactibilidad	Beneficios totales
MSF	118.615	441.870
MN	44.208	469.503

De la Tabla 3.4 se puede apreciar la presencia de *costos de infactibilidad* en las soluciones de ambos modelos, pero aún así los beneficios totales esperado del MN siguen siendo superiores a las del MSF por un 6,2%. De acuerdo a los resultados obtenidos se

puede concluir que efectivamente la incertidumbre existente en los tiempos de fermentación conlleva a unos costos que impactan directamente a los beneficios totales de la planificación. Es por ello que resulta interesante el poder limitar estos costos incluso si es que esto implica un aumento aún mayor en los costos operacionales y/o en costos de pérdida de calidad, siempre y cuando estos permitan alcanzar mayores beneficios totales mediante una compensación en la reducción de los *costos de infactibilidad*.

4. METODOLOGÍAS DE OPTIMIZACIÓN ROBUSTA

Uno de los principales objetivos de este trabajo es demostrar que utilizando las técnicas de optimización robusta es posible generar un modelo que permita obtener soluciones que se encuentren protegidas ante la variabilidad existente en los tiempos de fermentación de las cosechas. En este capítulo se analizarán distintos enfoques sobre cómo adaptar la problemática hacia la optimización robusta, comparando los beneficios y desventajas que se generarían en caso de seleccionar cada modelo. Lo que se busca es identificar aquel enfoque que permita adaptar de mejor forma la problemática que se está intentando solucionar.

4.1. Enfoques analizados

De modo de simplificar el entendimiento de los diversos enfoques que se analizarán, a continuación se plantea el siguiente problema que servirá como base del desarrollo de los diferentes enfoques. El modelo es el siguiente:

$$\begin{aligned} \max \quad & c^T x & (4.1) \\ \text{s.a} \quad & \\ & Ax \leq b \\ & l \leq x \leq u \end{aligned}$$

Sin pérdida de generalidad, se asume que los parámetros sujetos a incertidumbre podrán estar presentes tanto en la matriz A como en el vector b . Esto de acuerdo al modelo de datos U que indica que los datos se pueden considerar inciertos pero acotados (Ben-Tal y Nemirovski, 2000). Para los casos donde el vector c pudiera contener parámetros sujetos a incertidumbre, estos pueden ser reformulados de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
& \max \quad z && (4.2) \\
& \text{s.a} \\
& \quad c^T x \geq z \\
& \quad Ax \leq b \\
& \quad l \leq x \leq u
\end{aligned}$$

Haciendo de los casos donde la variabilidad se encuentra presente en la función objetivo un caso particular de la modelación original. A modo de simplificación, se asume que el parámetro $a_{i,j}$ corresponderá a alguno de los parámetros sujetos a variabilidad. Este parámetro $a_{i,j}$ corresponde al elemento (i, j) de la matriz A , el cual puede ser representado a través de la siguiente variable aleatoria $\tilde{a}_{i,j}$:

$$\tilde{a}_{i,j} = (1 + \epsilon \cdot \sigma_{i,j})a_{i,j} \quad (4.3)$$

En donde $\sigma_{i,j}$ representa a una variable aleatoria la cual distribuye de manera uniforme dentro del intervalo $[-1, 1]$, y ϵ como un coeficiente de valor positivo respecto del nivel de variabilidad que se desea asumir. Con ello, se es posible asumir que la variable $\tilde{a}_{i,j}$ se encontrará contenida dentro del intervalo $[a_{i,j} - \hat{a}_{i,j}, a_{i,j} + \hat{a}_{i,j}]$, teniendo a $\hat{a}_{i,j}$ como el valor absoluto de la máxima perturbación que puede sufrir. Lo anterior puede ser realizado sin importar si se conoce o no cuál es la función de distribución que sigue esta variable.

4.1.1. Enfoque Soyster

La primera aproximación hacia lo que se conoce hoy como Optimización Robusta fue presentada por Soyster (1973). En ella se propuso un modelo de optimización que posee una estructura lineal para la búsqueda de soluciones que sean factibles dentro de un conjunto convexo de datos. Soyster considera el siguiente problema de optimización:

$$\begin{aligned}
& \max \quad c^T x && (4.4) \\
& \text{s.a} \\
& \sum_{j=1}^n A_j x_j \leq b && \forall A_j \in K_j, j = 1, \dots, n \\
& x \geq 0
\end{aligned}$$

Donde el conjunto K_j se asume como convexo. En su trabajo, Soyster demuestra que el modelo anteriormente descrito es equivalente a:

$$\begin{aligned}
& \max \quad c^T x && (4.5) \\
& \text{s.a} \\
& \sum_{j=1}^n \bar{A}_j x_j \leq b && \forall \bar{A}_j \in K_j, j = 1, \dots, n \\
& x \geq 0
\end{aligned}$$

Donde $\bar{a}_{i,j} = \lceil A_{i,j} \rceil$, $A_j \in K_j$

De esta forma la matriz \bar{A} se encuentra construida únicamente por los elementos más extremos de cada uno de los parámetros sujetos a incertidumbre. Actualmente el enfoque de Soyster se le conoce como el enfoque del peor caso, en donde las soluciones encontradas surgen precisamente al utilizar los valores más extremos de cada uno de los parámetros que se encuentran sujetos a variaciones. Al utilizar este modelo se logra asegurar que todas las soluciones encontradas siempre serán factibles ante cualquier escenario de variación de los parámetros sujetos a incertidumbre. Esto siempre y cuando los valores de los parámetros se encuentren dentro del dominio especificado.

Sin embargo, los resultados de este modelo pueden resultar extremadamente costosos de implementar, especialmente para los casos donde existan problemas de capacidades limitadas o de costos fijos elevados. Lo anterior sucede por que al satisfacer hasta los casos más extremos, o en otras palabras los casos más improbables, se estarán tomando resguardos que podrían ser considerados como excesivos, generando un aumento importante en la estructura de costos. En situaciones aún mas complejas puede resultar que estos resguardos no sean un real aporte respecto de los objetivos que se persiguen, transformando estos esfuerzos en una simple ineficiencia de recursos.

4.1.2. Enfoque Ben-Tal y Nemirovski

Un segundo enfoque fue el que utilizaron Ben-Tal y Nemirovski (2000), en donde los autores buscaban no tener que sacrificar en exceso la optimalidad de las soluciones. El modelo planteado es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 & \max \quad c^T x && (4.6) \\
 & \text{s.a} \\
 & \sum_j a_{i,j} x_j + \sum_{j \in J_t} \hat{a}_{i,j} y_{i,j} + w_i \sqrt{\sum_{j \in J_t} \hat{a}_{i,j}^2 z_{i,j}^2} \leq b_i && \forall i \\
 & -y_{i,j} \leq x_j - z_{i,j} \leq y_{i,j} && \forall i, j \in J_i \\
 & l \leq x \leq u \\
 & y \geq 0
 \end{aligned}$$

Bajo el modelo de incerteza de datos U , el cual contiene a todos los elementos sujetos a incertidumbre, los autores demuestran que la probabilidad de que la i -ésima restricción sea violada a lo más podría tomar el valor de $e^{-\frac{\omega_i^2}{2}}$. Este segundo enfoque es menos conservador que el planteado por Soyster (1973), ya que no todas las soluciones factibles identificadas a través del enfoque de Soyster podrán ser una solución factible de este segundo enfoque. En particular, este modelo tiende a descartar los escenarios más pesimistas, o sea

aquellos escenarios en donde prácticamente todos los parámetros sujetos a incertidumbre tomaron su valor más extremo. Adicionalmente, a través del valor que se le asignase al parámetro ω_i , se puede regular el grado de conservacionismo que se desea adoptar para cada restricción. Esta mayor libertad permite que se puedan tomar mayores o menores resguardos respecto de cada una de las restricciones, pero sin tener que sacrificar de manera excesiva la optimalidad de las soluciones.

Sin embargo, a diferencia del modelo propuesto en el enfoque de Soyster, el cual utiliza una estructura lineal, este segundo enfoque sigue un modelo de segundo orden cónico. Con ello, la complejidad del modelo aumenta ostensiblemente, haciendo que este enfoque no sea tan atractivo para la resolución robusta de problemas de optimización discreta.

4.1.3. Enfoque Bertsimas y Sim

Bertsimas y Sim desarrollaron un enfoque de modelación robusta que permite mantener las ventajas de la modelación lineal sin tener que sacrificar de manera excesiva la optimalidad de las soluciones. Para ello, se asume que las variabilidades existentes se encontrarán dentro del modelo de datos U .

Este enfoque plantea que la i -ésima restricción del problema nominal, $a_i^t x \leq b_i$, puede presentar variabilidad a través de sus parámetros $a_{i,j}$. Para ello se tiene a J_i como el conjunto de coeficientes de $a_{i,j}$, $j \in J_i$, como los parámetros que se encuentran sujetos a variabilidad. Luego $\tilde{a}_{i,j}$, con $j \in J_i$, toma valores de acuerdo a una distribución simétrica con una media igual al valor nominal de $a_{i,j}$ dentro del intervalo $[a_{i,j} - \hat{a}_{i,j}, a_{i,j} + \hat{a}_{i,j}]$. Esto provoca que por cada i se introduzca un parámetro γ_i , el cual no es necesariamente entero, puede tomar valores dentro del intervalo $[0, \lfloor J_i \rfloor]$. El objetivo del parámetro γ_i es el de ajustar el nivel de protección que se desea asumir para la i -ésima restricción del modelo, en donde a mayor valor del parámetro γ_i , mayor será el nivel de protección que se estará tomando respecto de esta restricción (Bertsimas y Sim, 2004). El modelo propuesto es el siguiente:

$$\max \quad c^T x \quad (4.7)$$

s.a

$$\sum_j a_{i,j} x_j + \max_{\{S_i \cup \{t_i\} | S_i \subseteq J_i, |S_i| = \lfloor \rho_i \rfloor, t_i \in J_i \setminus S_i\}} \left(\sum_{j \in S_i} \hat{a}_{i,j} x_j + (\rho_i - \lfloor \rho_i \rfloor) \hat{a}_{i,t_i} x_j \right) \leq b_i \quad \forall i$$

$$-y_i \leq x_j \leq y_i \quad \forall j$$

$$l \leq x \leq u$$

$$y \geq 0$$

En donde si ρ_i se escoge como un entero, la i -ésima restricción se encontrará protegida por $\beta_i(x, \rho_i) = \max_{\{S_i | S_i \subseteq J_i, |S_i| = \rho_i\}} \left(\sum_{j \in S_i} \hat{a}_{i,j} |x_j| \right)$. Para el caso de $\rho_i = 0$, implicaría que $\beta_i(x, 0) = 0$, con lo que las restricciones serían equivalentes a las del problema nominal. En el caso que $\rho_i = |J_i|$, se obtendría el mismo resultado que en el enfoque de Soyster. Por lo tanto, al variar $\rho_i \in [0, |J_i|]$, se genera la posibilidad de ajustar el nivel de robustecimiento del modelo en contrapeso del nivel de conservacionismo de la solución. La ventaja de este modelo es que se lo puede transformar en un modelo lineal utilizando la siguiente proposición, en donde dado el vector x^* , la función de protección de la i -ésima restricción sería:

$$\beta_i(x^*, \rho_i) = \max_{\{S_i \cup \{t_i\} | S_i \subseteq J_i, |S_i| = \lfloor \rho_i \rfloor, t_i \in J_i \setminus S_i\}} \left(\sum_{j \in S_i} \hat{a}_{i,j} |x_j^*| + (\rho_i - \lfloor \rho_i \rfloor) \hat{a}_{i,t_i} |x_j^*| \right)$$

Y su valor sería igual a la siguiente función objetivo lineal:

$$\beta_i(x^*, \rho_i) = \max \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{i,j} |x_j^*| z_{i,j} \quad (4.8)$$

s.a

$$\sum_{j \in J_i} z_{i,j} \leq \rho_i$$

$$0 \leq z_{i,j} \leq 1 \quad \forall j \in J_i$$

Los autores plantean que al obtener el problema dual del problema anterior, y reemplazándolo en la formulación inicial (4.7), se obtiene un problema equivalente, el cual es del tipo lineal:

$$\max \quad c^T x \quad (4.9)$$

s.a

$$\sum_j a_{i,j} x_j + z_i + \sum_{j \in J_i} p_{i,j} \leq b_i \quad \forall i$$

$$z_i + p_{i,j} \geq \hat{a}_{i,j} y_j \quad \forall i, j \in J_i$$

$$-y_j \leq x_j \leq y_j \quad \forall j$$

$$l_j \leq x_j \leq u_j \quad \forall j$$

$$p_{i,j} \geq 0 \quad \forall i, j \in J_i$$

$$y_j \geq 0 \quad \forall j$$

$$z_i \geq 0 \quad \forall i$$

Esta formulación presenta grandes ventajas, en particular por su bajo grado de complejidad que presenta el modelo. Sin embargo, esta formulación presenta problemas cuando los parámetros sujetos a variabilidad se encuentran relacionados entre sí, en particular para

relaciones donde el valor de un parámetro pueda aumentar, los valores de otros deben disminuir. Al existir este tipo de relaciones entre los parámetros sujetos a incertidumbre ya no se puede aplicar directamente la formulación anteriormente planteada, ya que estas relaciones no permiten que se pueda incluir el problema dual al problema nominal de manera directa.

4.1.4. Enfoque Bienstock y Özbay

Una manera alternativa de abordar el enfoque planteado por Bertsimas y Sim, es el que utilizan los autores Bienstock y Özbay (2008). De manera general, este enfoque se basa en la construcción de 2 modelos; el *problema maestro*, y el *problema adversario*.

(i) Problema maestro

$$\max c^T x \quad (4.10)$$

s.a

$$\sum_j a_{i,j} x_j + \beta_i(x, \rho_i) \leq b_i \quad \forall i$$

$$-y_j \leq x_j \leq y_j \quad \forall j$$

$$l_j \leq x_j \leq u_j \quad \forall j$$

$$y_j \geq 0 \quad \forall j$$

(ii) Problema adversario:

$$\beta_i(x^*, \rho_i) = \max \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{i,j} |x_j^*| z_{i,j} \quad (4.11)$$

s.a

$$\sum_{j \in J_i} z_{i,j} \leq \rho_i \quad \forall i$$

$$0 \leq z_{i,j} \leq 1 \quad \forall j \in J_i$$

4.1.4.1. Algoritmo de resolución

A este tipo de modelación se le conoce con el nombre de modelación con problema adversario. Al igual que en el enfoque de Bertsimas y Sim se plantea la existencia de una función de protección $\beta_i(x^*, \rho_i)$ para la i -ésima restricción que depende de un vector x^* . Esta función de protección funciona como la holgura máxima que se puede encontrar para un determinado presupuesto de incerteza ρ_i , y un determinado vector de soluciones x^* del *problema maestro*. Con todo lo anterior se plantea el siguiente algoritmo para encontrar una solución:

Se asume como R el conjunto de restricciones del *problema maestro*, i el número de iteraciones realizadas hasta el momento y F el valor de la función objetivo del problema nominal. Se inicializa el modelo con un conjunto de Restricciones R , con $\beta_i(x, \rho_i) = 0, \forall i, F = F' = 0$, número de iteraciones $i = 0$.

- (i) Se resuelve el problema de optimización del *problema maestro* utilizando el set de restricciones R , generándose así un vector de solución x^* y un valor para la función objetivo, F .
- (ii) Se ingresa como parámetros del *problema adversario* los valores obtenidos del vector x^* . Se resuelve el *problema adversario* encontrándose el máximo valor para la función $\beta_i(x^*, \rho_i)$.
- (iii) Se añade al set de restricciones R del *problema maestro* una nueva restricción para cada valor $\beta_i(x^*, \rho_i)$ que se ha generado desde el *problema adversario*. Luego se resuelve el *problema maestro* utilizando el nuevo set de restricciones R' encontrándose así un nuevo vector x^* junto con un nuevo valor de la función objetivo F' . Se aumenta en 1 el número de iteraciones i .
- (iv) Se comparan los valores de F y F' , en donde si se cumple un determinado criterio de término, i.e. $|F - F'| \leq 10^{-3}$ ó número de iteraciones $i \geq 10$, se da por terminado el algoritmo teniéndose como solución el último vector x^* encontrado y a F' como el valor de la función objetivo. En caso de no cumplirse el criterio de término, se regresa al paso ii) del algoritmo.

El algoritmo se repetirá tantas veces como sea necesario hasta alcanzar alguno de los criterios de término que se han planteado. Si bien el modelo del enfoque adversario no asegura encontrar una solución óptima del problema original, este enfoque si permite acercarse bastante a ello. Esto es realizado mediante la configuración de un parámetro de tolerancia. En particular se le asignó un valor de 0.02, en donde lo que esto indica es que el algoritmo de resolución se detendrá cuando la mejor solución entera encontrada hasta el momento esté a lo más a un 0.02% de distancia del valor óptimo del problema lineal relajado. Luego este enfoque permite que se puedan resolver problemas como los planteados en el enfoque de Bertsimas y Sim pero sin tener la necesidad de incorporar el problema dual del *problema adversario* al *problema maestro*.

4.2. Enfoque utilizado

Luego de un proceso de análisis de los beneficios y desventajas de cada enfoque, y dada la estructura del problema que se está intentando abordar, se ha decidido utilizar el enfoque del problema adversario planteado por Bienstock y Özbay (2008) para la resolución de este trabajo.

El enfoque de Soyster (1973) ha sido descartado dado a su estricto grado de conservacionismo de las soluciones que generaba, afectando de sobremanera a la optimalidad de las soluciones sin tener opción alguna de flexibilizar en este criterio.

El enfoque de Nemirovski y Ben-Tal (2000), si bien permite manejar el grado de conservacionismo de las soluciones a través del presupuesto de incerteza que se desea utilizar, éste ha sido descartado dado su alto grado de complejidad que implica su modelación, en donde se pierden los beneficios de los modelos lineales al tener variables de segundo grado y restricciones no lineales. En la práctica, este enfoque imposibilitaría que pudiera ser utilizado en problemas de gran tamaño, en donde los tiempos de resolución de estos es un factor relevante, especialmente si se desea abordar problemas de nivel operacional como lo es en este caso.

Finalmente el enfoque planteado por Bertsimas y Sim (2004) ha sido descartado por la gran complejidad matemática que implicaría el incorporar el problema dual del problema adversario al problema nominal. Esto sucede por la estructura propia que tiene la modelación planteada, en donde los parámetros a considerar que se encuentran sujetos a incertidumbre - la esperanza de las probabilidades de los tiempos totales de fermentación -, se encuentran ligados entre sí, pero además estos parámetros se encuentran presentes de manera simultánea en diferentes restricciones del problema. Luego no es posible aplicar de manera directa lo planteado por el enfoque de Bertsimas y Sim, ya que este requiere que los parámetros sujetos a incertidumbre sean independientes entre si, y además que estos se encuentren presentes en una única restricción a la vez. Una opción para solucionar este inconveniente sería el de generar una proyección de estos parámetros hacia los distintos planos que son generados por las variables del problema, de esta forma se podrían generar restricciones que cumplieran con los requisitos que plantea el enfoque de Bertsimas y Sim. Sin embargo, se ha optado por dejar esta posibilidad como una futura expansión de este trabajo.

Considerando todo lo anterior, se ha decidido utilizar el enfoque planteado por Bienstock y Özbay (2008). Realizando algunos ajustes menores, se es posible incluir a este enfoque las relaciones planteadas entre los parámetros sujetos a incertidumbre, y a la vez mantener en gran parte los beneficios de la modelación lineal. Para ello, es necesario añadir al problema adversario restricciones que incorporen la respectiva ligación existente entre los tiempos de fermentación, asemejándolo a un problema de flujo. Además, al igual que en los enfoques de Nemirovski y Ben-Tal (2000), como en el de Bertsimas y Sim (2004), este enfoque permite controlar el grado de conservacionismo que se desea utilizar en la búsqueda de las soluciones, haciendo de este el enfoque idóneo para la modelación a realizar.

5. MODELACIÓN PROBLEMA ROBUSTO

Este capítulo describe la modelación utilizada para la mitigación de los efectos de la incertidumbre respecto a los tiempos de fermentación de las cosechas. Para ello siguiendo las directrices planteadas por el enfoque de Özbay y Bienstock en la Sección 4.1.4, y utilizando la base del modelo nominal planteado en la Sección 3.2.1, se construye un nuevo modelo que permite abarcar las problemática planteadas.

5.1. Modelación problema maestro

El *problema maestro* (PM) utiliza la misma estructura propuesta en el MN. Su única diferencia radica en el hecho que el PM admite incertidumbre en los parámetros α . A diferencia de lo que sucede en el MN, el cual únicamente considera valores determinísticos. Con ello, la restricción de capacidad (3.48) es modificada de la siguiente manera:

$$\sum_{p,j,n \leq t} (1 - \sum_{k \leq t} \alpha_{i,k,v,n,j}) \cdot X_{p,n,j,v} \leq CV_v \quad \forall i, v, t \quad (5.1)$$

La diferencia radica en la inclusión del subíndice i , el cual hace referencia a los valores de los α durante la iteración i del enfoque adversario. Por construcción, los valores de los α en $i = 0$ corresponden a los valores promedios de las probabilidades de los tiempos de fermentación. Luego, por cada iteración adicional que se desarrolle se incrementará el valor del subíndice i , incorporando las nuevas restricciones. Estas nuevas restricciones son idénticas a las planteadas por la restricción (3.48), salvo que los valores de los α corresponden a los valores obtenidos en la última iteración del problema adversario.

5.2. Modelación problema adversario

Siguiendo una variación del enfoque propuesto por Bienstock y Özbay (2008) descrito en la Sección 4.1.4 , se utilizó como problema adversario el siguiente modelo:

(i) Índices

j :	Cuartel $\{1, \dots, 97\}$
t :	Período o Fecha $\{1, \dots, 77\}$
p :	Método de producción $\{MA, ME\}$.
c :	Tipo de cepa $\{CF, CS, SY, Ca, SB, Ch\}$
v :	Viña de destino cosechas $\{B1, B2, EXT\}$

(ii)

Subconjuntos

$J_p \subseteq J$	Conjunto de cuarteles que pueden ser cosechados mediante el método de producción p .
$J_c \subseteq J$	Conjunto de cuarteles que tienen cepas de uva c .

(iii) Parámetros

$\bar{\alpha}_{k,v,n,j}$	Probabilidad promedio que las cosechas realizadas en el cuartel j , durante el día n , para ser enviadas a la viña v , terminen su período de fermentación el día k .
$\hat{\alpha}_{k,v,n,j}$	Valor máximo de variabilidad en la probabilidad que las cosechas realizadas en el cuartel j , durante el día n , para ser enviadas a la viña v , terminen su período de fermentación el día k .
$X_{p,t,j,v}^*$	Cantidad de kilos cosechados mediante el método de producción p , durante el día t , en el cuartel j para ser enviados a la viña v en la última solución del <i>problema maestro</i> .
γ_v	Presupuesto de variabilidad total en el problema adversario para las cosechas a ser enviadas a la viña v .

(iv) Variables

$Z_{v,k,t,j}$	Porcentaje a utilizar de la variación máxima de $\hat{\alpha}_{k,v,n,j}$.
$\mu_{v,k,t,j}$	Variable auxiliar para controlar en el aumento de la variación máxima de $\hat{\alpha}_{k,v,n,j}$.
$\nu_{v,k,t,j}$	Variable auxiliar para controlar en la disminución de la variación máxima de $\hat{\alpha}_{k,v,n,j}$.

(v) Modelo Adversario

$$\min \sum_{p,j,v,t,k} \sum_{n \leq t} \hat{\alpha}_{k,v,n,j} X_{p,n,j,v}^* Z_{v,k,t,j} \quad (5.2)$$

s.a

$$\sum_{k=1}^{78} \mu_{v,k,t,j} + \nu_{v,k,t,j} \leq \gamma_v \quad \forall v, t, j \quad (5.3)$$

$$\sum_{k=1}^{78} \bar{\alpha}_{k,v,t,j} + \hat{\alpha}_{k,v,t,j} Z_{v,k,t,j} = 1 \quad \forall v, t, j \quad (5.4)$$

$$\bar{\alpha}_{k,v,t,j} + \hat{\alpha}_{k,v,t,j} Z_{v,k,t,j} \geq 0 \quad \forall v, k, t, j \quad (5.5)$$

$$0 \leq Z_{v,k,t,j} \leq 1 \quad \forall v, k, t, j \quad (5.6)$$

$$\mu_{v,k,t,j} - \nu_{v,k,t,j} = Z_{v,k,t,j} \quad \forall v, k, t, j \quad (5.7)$$

$$0 \leq \mu_{v,k,t,j} \leq 1 \quad \forall v, k, t, j$$

$$0 \leq \nu_{v,k,t,j} \leq 1 \quad \forall v, k, t, j$$

(vi) Explicación de la función objetivo

La función objetivo del *problema adversario* busca encontrar las perturbaciones a los parámetros α donde las probabilidades de estas afecten a la mayor cantidad

de cosechas planificadas posibles. Para ello, se le ingresan como parámetros de X^* los valores obtenidos de las variables X de la última iteración del PM. Luego se buscan los valores de z tales que se maximicen los efectos de estas perturbaciones.

(vii) Explicación Restricciones

- (5.3) Controla que no se sobrepase el presupuesto máximo de incertidumbre
- (5.4) Controla que la suma de probabilidades dentro del horizonte completo de variación sea 1 para las cosechas enviadas a la viña v , realizadas en el cuartel j y durante el día n .
- (5.5) Controla que todas las probabilidades sigan siendo positivas.
- (5.6) Controla que las variaciones a efectuar en las probabilidades no sobrepasen en mas de un 100% respecto del valor definido en $\hat{\alpha}$.
- (5.7) Cambio de variable de $|Z|$ por la resta de dos variables positivas μ y ν .

Al modelo anteriormente descrito se le denominará como *problema adversario* (PA). Los valores de z obtenidos serán utilizados para calcular los valores de los nuevos α , los cuales serán introducidos como restricciones adicionales del PM. Al realizar una nueva iteración del PM estaremos robusteciendo el problema de la capacidad principalmente desde el punto de vista donde se encuentren concentrados los mayores volúmenes de cosechas. Por ende, el PA buscará la modificación de los valores de los parámetros α que generen las mayores probabilidades de violar las restricciones de capacidad. De esta forma, el nivel de robustecimiento de las soluciones dependerá directamente del presupuesto de incertidumbre que se utilice, pero también de la cantidad de iteraciones que se desee realizar entre el PM y PA.

Sin embargo, independiente del presupuesto de incertidumbre utilizado, el exigir una mayor cantidad de iteraciones entre el PM y el PA implicarán mayores tiempos de resolución del modelo. Este hecho adquiere una mayor relevancia producto del enfoque operacional del problema, en donde se deben tomar decisiones de manera continua, transformando a los tiempos de resolución del modelo en un parámetro muy relevante para la toma de decisiones. Luego, dado que las iteraciones del algoritmo requieren una cantidad considerable de tiempo, existirá una limitante externa a la modelación la cual limitará la cantidad de iteraciones que se podrán realizar del algoritmo. De esta forma se estará restringiendo a que se puedan realizar una cierta cantidad de iteraciones, impidiendo alcanzar la cantidad necesaria de estas de modo de alcanzar la robustez óptima del modelo para el presupuesto de incertidumbre seleccionado.

Adicionalmente, un mayor valor del presupuesto de incertidumbre implicará soluciones más robustas pero a costa de sacrificar mayores utilidades producto de mayores costos operacionales y costos por pérdida de calidad. Dado todo lo anterior, se deberá encontrar aquel punto que permita balancear todos estos efectos, lo cual dependerá de las prioridades que se determinen.

5.3. Presupuesto de incertidumbre

El presupuesto de incertidumbre consiste en el grado de protección que se le desea aplicar a las restricciones del modelo en cuanto a la incertidumbre existente en los parámetros sujetos a variabilidad. Este mayor robustecimiento es controlado a través del parámetro γ , el cual puede ser entendido como la cantidad total de parámetros, dentro de las soluciones del problema adversario, a los cuales se les permitirá tomar su valor más extremo.

Mediante la restricción (5.4) se obliga a que el aumento del valor de alguno de los coeficientes del modelo sea compensado con una reducción equivalente por el resto de los coeficientes presentes en aquella restricción. Además se exige que la suma de todos ellos debe ser igual a 1 a lo largo del horizonte de tiempo. Esta restricción es lo que

precisamente impide que se puedan generar soluciones como las descritas por Soyster en el modelo del peor caso. Dada esta relación, no es posible que todos los parámetros sujetos a incertidumbre puedan alcanzar su valor más extremo al mismo tiempo. Por lo cual, sin importar el presupuesto de incertidumbre que se asuma, siempre existirán escenarios en donde las soluciones propuestas por el modelo generen costos de infactibilidad.

Los motivos de esta restricción se basan en el hecho que la capacidad es vista como si fuese un problema de flujo. El no exigir que la suma de los α en cada una de estas restricciones sea 1, ocasionaría que para cada día de cosecha existiría una determinada capacidad de almacenamiento de las bodegas que nunca se recuperaría, llegando a un punto en donde a partir de un determinado día t , ya no existiría capacidad disponible en ninguna de las bodegas. Lo anterior sucedería por la forma en la que esta planteada la restricción de capacidad (5.1). En esta, para cada período de tiempo t , la capacidad máxima a ser utilizada estará acotada por la cantidad de cosechas que hayan finalizado sus períodos de fermentación. Luego, si la suma de los α fuese inferior a 1, se le estaría haciendo creer al modelo que existe una parte de las cosechas nunca finalizaría su período de fermentación. Esto ocasionaría que progresivamente se esté utilizando una capacidad de manera ficticia con estas cosechas remanentes, llegando a un punto en donde toda la capacidad disponible estaría siendo utilizada por estas.

Dado lo anterior, existe un intervalo de valores del presupuesto de incertidumbre, partiendo desde $\gamma = 0$, para el cual el problema se comporta como el descrito en la Sección 3.2.1, hasta uno en el cual el problema alcanza su máximo nivel de robustecimiento. A partir de este valor, valores superiores de γ entregarán las mismas soluciones, por lo que no tendría sentido seguir aumentando su valor.

A modo de encontrar los valores extremos para las cotas del parámetro γ , se realizaron ejecuciones iterativas del modelo, con incrementos de 10 unidades en el presupuesto de incertidumbre entre cada iteración. Los cambios fueron medidos mediante simulaciones de escenarios, en donde los valores de α en cada escenario fueron construidos mediante una distribución uniforme, $U \sim (-0.5, 0.5)$ respecto del porcentaje de variación de su valor

promedio.

$$\alpha_{n,v,t,j}^* = \bar{\alpha}_{n,v,t,j} + \bar{\alpha}_{n,v,t,j} \cdot U \quad (5.8)$$

6. RESOLUCIÓN MODELOS

Este capítulo presenta los resultados obtenidos en el desarrollo de la modelación planteada por el PM y PA, y de como estos son capaces de abordar el problema de la incertidumbre. Se presenta una breve demostración de la importancia existente en la inclusión de los tiempos de fermentación, para luego dar paso a los efectos que la incertidumbre genera en la estructura de las soluciones. Se analizan los resultados de cada uno de los modelos propuestos, distinguiendo los diferentes costos existentes y de como estos son generados. Finalmente se hace un resumen de los resultados obtenidos, generando una propuesta de acuerdo a cual debiese ser el modelo a seleccionar.

6.1. Solución del problema ante incertidumbre

En la Sección 3.3.2 se observó cómo la inclusión de los tiempos de fermentación afectaban a la estructura de las soluciones de los modelos. En esta se observaba una disminución de la concentración de las cosechas realizadas en los días óptimos, distribuyendo esta diferencia hacia el resto de los días dentro del horizonte de tiempo.

Sin embargo, la incertidumbre existente en los tiempos de fermentación ocasionó que se apreciara una reducción de un 8,6% en los beneficios totales del MN cuando las soluciones de este eran evaluadas en escenarios sujetos a incertidumbre. Producto de esto se puede establecer que existe un margen para el cual las soluciones del PM podrían entregar mayores beneficios netos que los del MN, concretamente un margen de un 8,6%. Este margen podría ser alcanzado, teóricamente, si es que las soluciones pudiesen estar completamente protegidas ante los efectos de incertidumbre en los tiempos de fermentación, y por consiguiente, protegida ante estos nuevos costos de infactibilidad. Sin embargo, dada la estructura de la modelación del PA, la modelación nunca permitirá que se puedan generar soluciones protegidas completamente ante estos efectos.

6.1.1. Resultados modelo diferentes valores de γ

Se analizaron los resultados de diversas combinaciones de γ y número de iteraciones. Los resultados de cada uno de los modelos fueron realizadas exigiendo que las soluciones enteras propuestas por el solver, CPLEX, presenten una diferencia relativa respecto de la solución óptima relajada de a lo más de un 2%.

En la Tabla 6.1 se un resumen de los valores obtenidos respecto de las funciones objetivos de cada uno de los modelos. Esto según la cantidad de iteraciones realizadas.

TABLA 6.1. Valor función objetivos para diferente valores de γ y número de iteraciones

Iteraciones / Modelo	MN	$\gamma = 20$	$\gamma = 50$	$\gamma = 70$	$\gamma = 100$
0	513.711	513.711	512.576	512.492	512.232
1	513.711	513.701	513.496	512.649	512.393
2	513.711	513.453	512.678	512.583	512.362
3	513.711	513.440	512.555	512.485	512.361
4	513.711	513.386	512.534	512.438	512.361
5	513.711	513.302	512.532	512.365	512.361
6	513.711	513.252	512.531	512.348	512.347
7	513.711	512.801	512.525	512.324	512.336
8	513.711	512.728	512.496	512.245	512.295
9	513.711	512.576	512.492	512.232	512.287

En la Figura 6.1.1 se puede observar que el valor de la función objetivo de cada modelo disminuye a medida que aumentan las iteraciones realizadas en cada uno de estos, sin importar el valor de γ utilizado. En todos los modelos se observa un claro decrecimiento general en los valores de las funciones objetivo a medida que aumentan la cantidad de iteraciones. Aquello es consistente con el hecho que entre mayor sea el grado de robustecimiento que se le exijan a los modelos, o sea mayor número de iteraciones, menores seran los resultados de la función objetivo de estos. Esto sucede por el hecho que en cada iteración se agregan un nuevo conjunto de restricciones al problema maestro.

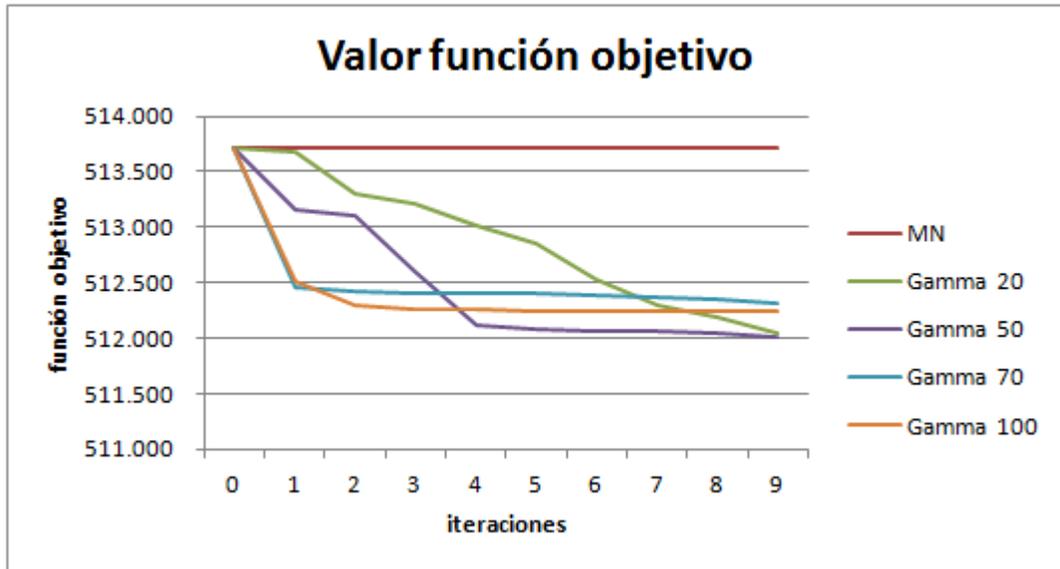


FIGURA 6.1. Graficos valor función objetivo según modelo

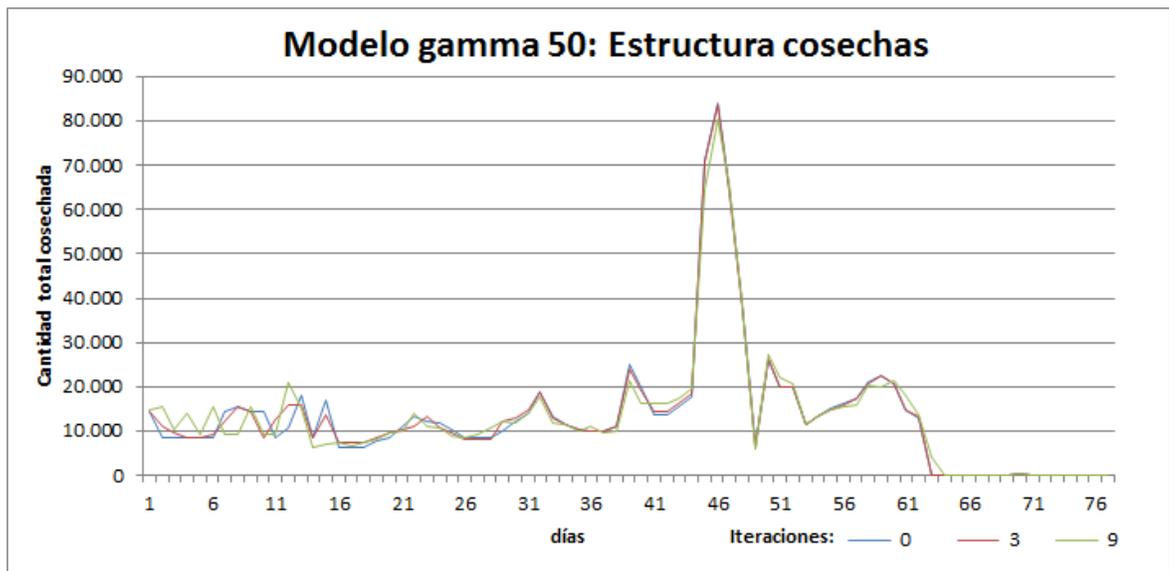


FIGURA 6.2. Ejemplo: Graficos cosechas totales según modelo $\gamma = 50$

Estas restricciones son adicionales a las que el modelo consideraba en la iteración anterior del algoritmo. Con lo cual, al verse reducido el espacio factible para las soluciones del modelo, únicamente puede existir un decrecimiento en los valores de la función objetivo, o en el mejor de los escenarios mantenerse.

La Figura 6.1.1 presenta una visión agregada respecto de la totalidad de las cosechas planificadas a realizar dentro de todos los cuarteles para cada día de cosecha. En esta se observa como las soluciones propuestas por cada uno de los modelos siguen una estructura bastante similar entre sí, generando una fuerte concentración de las cosechas en torno al día 46. Esto es ocasionado por el hecho que durante aquellas fechas, estas coinciden con las fechas óptimas de cosecha para las cepas del tipo *cabernet franc* y *cabernet sauvignon*. Para el caso de las cepas del tipo *carmenere* y *syrah*, el valor de su función de pérdida de calidad es aproximadamente de un 10% en ambos casos. Además se puede observar como a mayor número de iteraciones del modelo, las soluciones propuestas por estos tienden a seguir un cierto comportamiento de suavizamiento, en donde se disminuyen los *peaks* existentes en cuanto a las cantidades totales cosechadas en cada período.

Este cambio en la estructura de las soluciones implica un cambio en la estructura de los costos operacionales, principalmente variando la cantidad de trabajadores necesarios en cada período. De la Figura 6.1.1 se puede observar como los costos operacionales tienden a disminuir mientras mayor sea el número de iteraciones que el modelo utilice. El resumen de estos valores son presentados en la Tabla 6.1.1.

TABLA 6.2. Valor costo operacional para diferentes valores de γ y número de iteraciones

Modelo / Iteraciones	MN	$\gamma = 20$	$\gamma = 50$	$\gamma = 70$	$\gamma = 100$
0	290.194	290.194	290.194	290.194	290.194
1	290.194	289.897	290.746	288.434	289.256
2	290.194	290.728	290.362	289.179	289.309
3	290.194	291.107	289.710	289.224	289.422
4	290.194	290.827	289.545	289.237	289.431
5	290.194	290.130	289.209	289.233	289.451
6	290.194	289.752	289.163	289.235	289.401
7	290.194	289.079	289.209	289.240	289.401
8	290.194	288.974	289.258	289.246	289.401
9	290.194	289.226	289.312	289.251	289.401

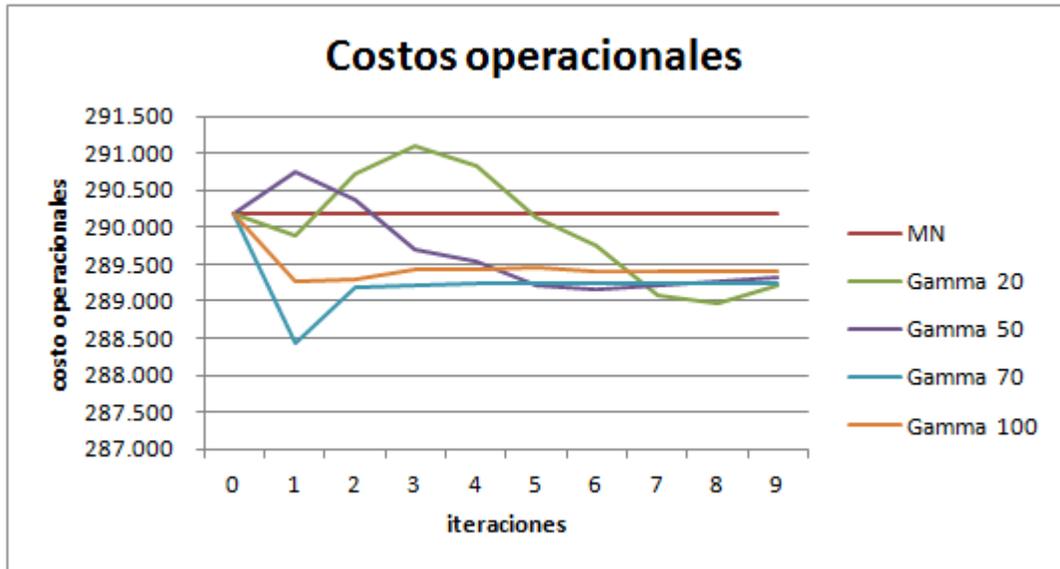


FIGURA 6.3. Graficos costos operacionales según modelo

Esta reducción en los costos puede ser entendido como un uso más eficiente del personal de trabajo. En particular de la Figura 6.1.1 se observa una importante reducción en la cantidad de trabajadores utilizados entre los períodos 19 al 37, manteniendo una cantidad más estable del personal contratado a lo largo del horizonte de evaluación.

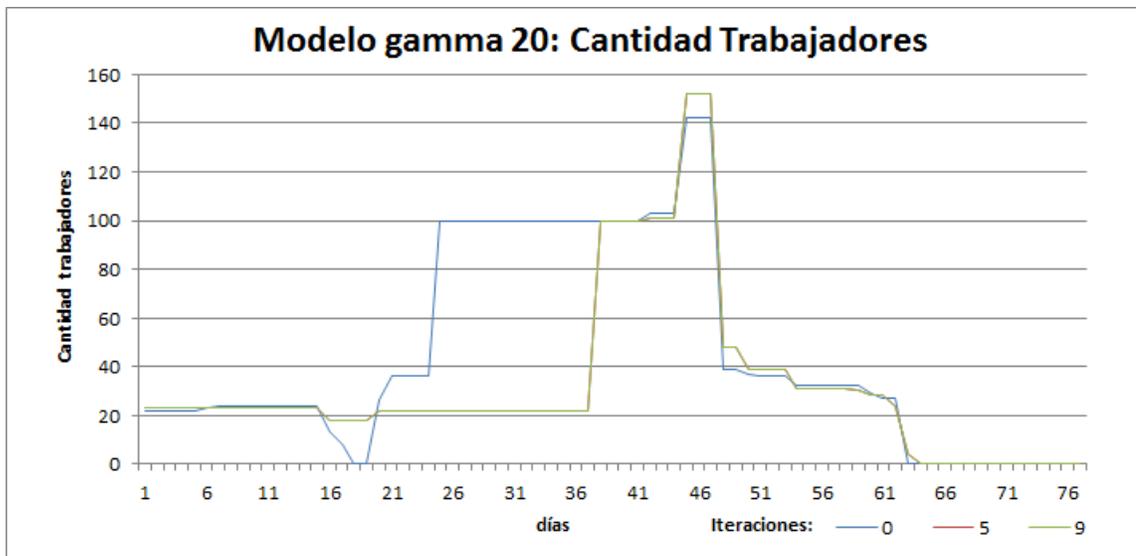


FIGURA 6.4. Gamma 20: Cantidad de trabajadores por fecha

Sin embargo, estos cambios en la estructura de las soluciones también generan un impacto en los costos de pérdida de calidad. En la Figura 6.1.1 se presenta la evolución de los costos de pérdida de calidad de las soluciones, y en la Tabla 6.3 un resumen del valor de estos.

TABLA 6.3. Valor costo pérdida de calidad según modelo de γ y número de iteraciones

Modelo / Iteraciones	MN	$\gamma = 20$	$\gamma = 50$	$\gamma = 70$	$\gamma = 100$
0	23.292	23.292	23.292	23.292	23.292
1	23.292	23.624	23.297	26.301	25.438
2	23.292	23.171	23.733	25.599	25.593
3	23.292	22.887	24.891	25.561	25.507
4	23.292	23.357	25.528	25.552	25.502
5	23.292	24.220	25.903	25.566	25.506
6	23.292	24.909	25.970	25.584	25.560
7	23.292	25.829	25.933	25.581	25.560
8	23.292	26.030	25.885	25.605	25.560
9	23.292	25.919	25.870	25.635	25.560

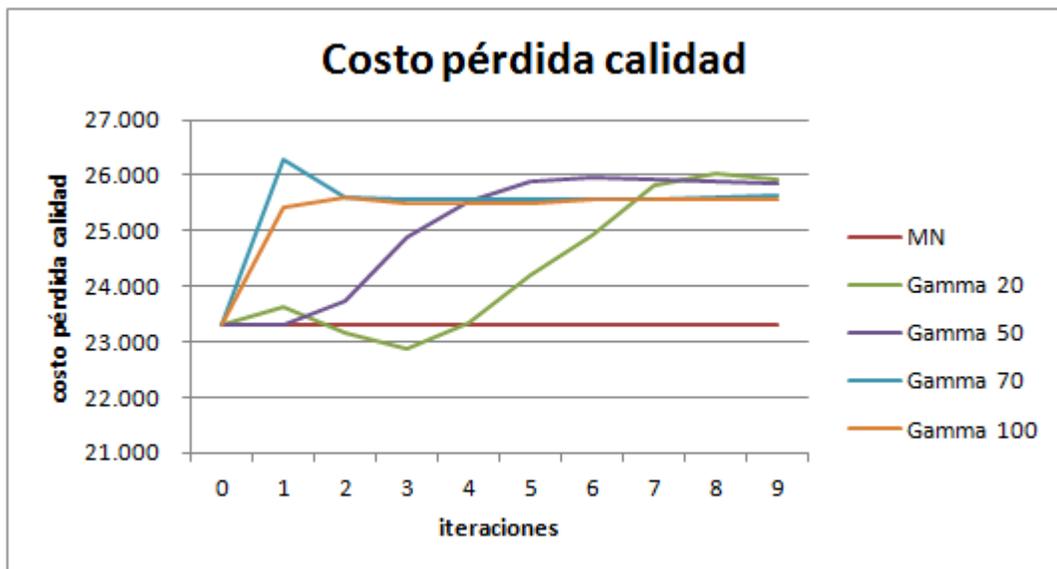


FIGURA 6.5. Graficos costos pérdida de calidad según modelo

6.1.2. Evaluación resultados ante incertidumbre

La evaluación de la incertidumbre existente en las probabilidades de finalización de los tiempos de fermentación fueron realizada mediante el método de generación de escenarios. Cada escenario consiste en la generación aleatoria de los valores α^* , los cuales se utilizarán como reemplazo de los valores α originales. Los valores de los α^* fueron construidos utilizando un parámetro fijo, el cual corresponde al valor promedio de las probabilidades de tiempos de fermentación, $\bar{\alpha}$, y por una parte variable, la cual podría aumentar o disminuir hasta un 50% el valor promedio de estas. Para ello se utilizó una distribución uniforme, $U \sim (-0.5, 0.5)$, la cual es multiplicada por el valor promedio de estos, $\bar{\alpha}$, generando así la variación deseada.

$$\alpha_{n,v,t,j}^* = \bar{\alpha}_{n,v,t,j} + \bar{\alpha}_{n,v,t,j} \cdot U \quad (6.1)$$

Para asegurar que la estructura de los α^* fuese consistente con lo planteado en la Sección 5.1, se aplicó una normalización de cada combinación de α^* , asegurando que la suma de las probabilidades de tiempos de fermentación fuese 1 para los α^* de un mismo t, v, j . Esto es entendido como que en cada escenario, la suma de las probabilidades de término de los períodos de fermentación de las cosechas realizadas en un determinado día t , para un determinado cuartel j , que son enviadas a la viña v , sea siempre 1. Esto fue realizado considerando a todos los días del horizonte de evaluación n , con $n \in 1, \dots, 78$.

Producto del tiempo que implica la evaluación de cada escenario en la simulación, aproximadamente 4 minutos por cada escenario de cada combinación γ - cantidad iteraciones, y dado el enfoque operacional de este problema, en donde los tiempos de resolución son un factor relevante, se optó por generar 100 escenarios de evaluación. De esta forma, se podrá obtener resultados estadísticamente significativos dentro de un margen de tiempo razonable. Se utilizaron como base los mismos 100 escenarios generados para evaluar las soluciones obtenidas en cada una de las combinaciones de γ - iteraciones, permitiendo

así realizar una evaluación equitativa entre estos. Los parámetros de medición de las evaluaciones fueron los siguientes:

- Porcentaje infactible: Mide el promedio de la cantidad de restricciones de capacidad, restricción 3.48, violadas en los 100 escenarios simulados.
- Capacidad faltante: Mide el promedio de la suma de las cantidades totales por las cuales las restricciones violadas exceden la capacidad máxima de las bodegas.
- Costo infactibilidad: Mide el promedio de los costos de maquila asociados a las cosechas que vieron excedidas las capacidades máximas de las bodegas.
- Beneficios totales: Mide el promedio de los beneficios totales calculados como la diferencia entre el valor de la función objetivo, menos, los costos de infactibilidad.
- Tiempos totales de resolución: Mide la suma de los tiempos de ejecución del solver, mas, los tiempos de evaluación de los resultados mediante la generación de escenarios.

En base a estos parámetros se evaluó el desempeño de cada uno de los modelos. El objetivo será el de seleccionar y proponer aquel modelo que pueda cumplir de la mejor forma las necesidades establecidas en la formulación del problema.

6.1.3. Evolución γ vs porcentaje infactible

De la Figura 6.1.3 se observa que no existe variación en los promedios de porcentajes infactibles para las soluciones de $\gamma = 0$. Esto es ocasionado producto que las soluciones resultaron idénticas para las diferentes cantidades de iteraciones, algo que es esperable, ya que al no tener un presupuesto de incertidumbre con el cual el PA pudiese operar, las soluciones en cada iteración siempre serán idénticas entre sí. Para el caso de $\gamma = 20$, se observa un fuerte decrecimiento en las primeras iteraciones, estabilizándose a partir de

la novena iteración. En los resultados del resto de los γ existe un relativa tendencia a estabilizarse a partir de la cuarta iteración. Estos datos se resumen en la Tabla 6.4.

TABLA 6.4. Evolución de porcentaje infactible por número de iteraciones para diferentes valores de γ

Modelo	Iteraciones	MN	$\gamma = 20$	$\gamma = 50$	$\gamma = 70$	$\gamma = 100$
	0	40	41	41	41	41
	1	40	39	30	11	15
	2	40	30	28	13	13
	3	40	29	20	12	13
	4	40	26	9	12	12
	5	40	24	9	12	13
	6	40	20	8	12	14
	7	40	15	9	11	13
	8	40	12	9	12	14
	9	40	8	8	12	14

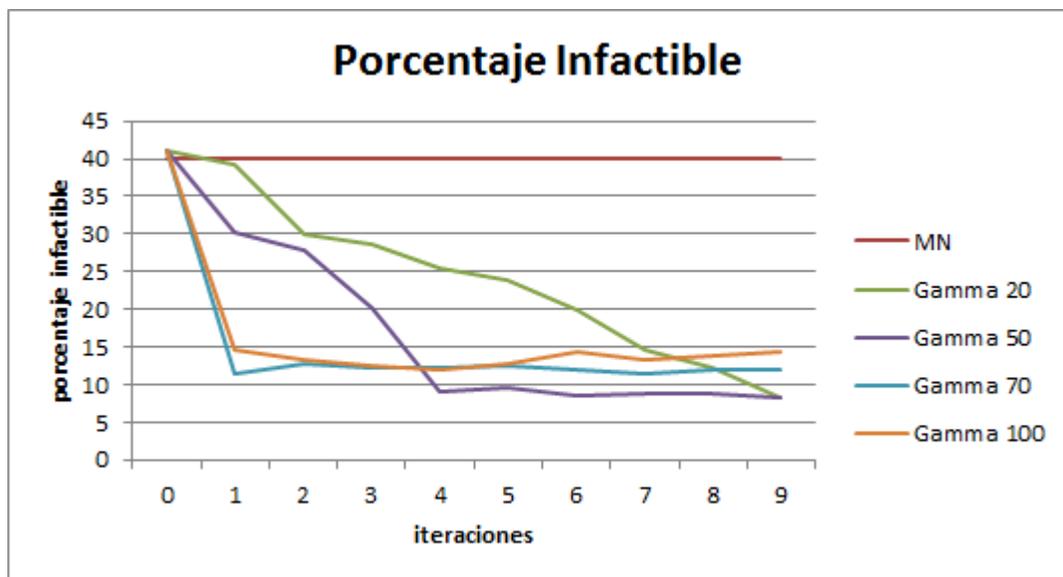


FIGURA 6.6. Evolución de porcentaje infactible por número de iteraciones para diferentes valores de γ

6.1.4. Evolución γ vs capacidad faltante

Al igual que para el porcentaje infactible, las soluciones para diferentes iteraciones de $\gamma = 0$ no presentan diferencias en los resultados de su capacidad faltante. De manera análoga, los resultados de los promedios de la capacidad faltante para los casos de $\gamma = 20$ presentan un fuerte decrecimiento en su valor, estabilizándose a partir de la novena iteración en adelante. En el resto de los γ , existe un comportamiento similar al observado en la Figura 6.1.3, en donde se aprecia una relativa tendencia a estabilizarse a partir de la cuarta y quinta iteración. Estos datos son presentados en la Figura 6.1.4 y se resumen en la Tabla 6.5.

TABLA 6.5. Evolución de capacidad faltante por número de iteraciones para diferentes valores de γ

Modelo / Iteraciones	MN	$\gamma = 20$	$\gamma = 50$	$\gamma = 70$	$\gamma = 100$
0	22.309	21.833	21.833	21.833	21.833
1	22.309	20.500	16.644	5.858	6.858
2	22.309	14.585	15.404	6.233	6.525
3	22.309	14.039	10.508	6.082	5.963
4	22.309	12.514	4.607	6.298	5.880
5	22.309	11.373	5.184	6.396	6.335
6	22.309	9.590	4.187	6.271	6.579
7	22.309	7.132	4.537	5.588	5.885
8	22.309	5.730	4.653	5.734	6.237
9	22.309	4.005	4.176	6.033	6.681

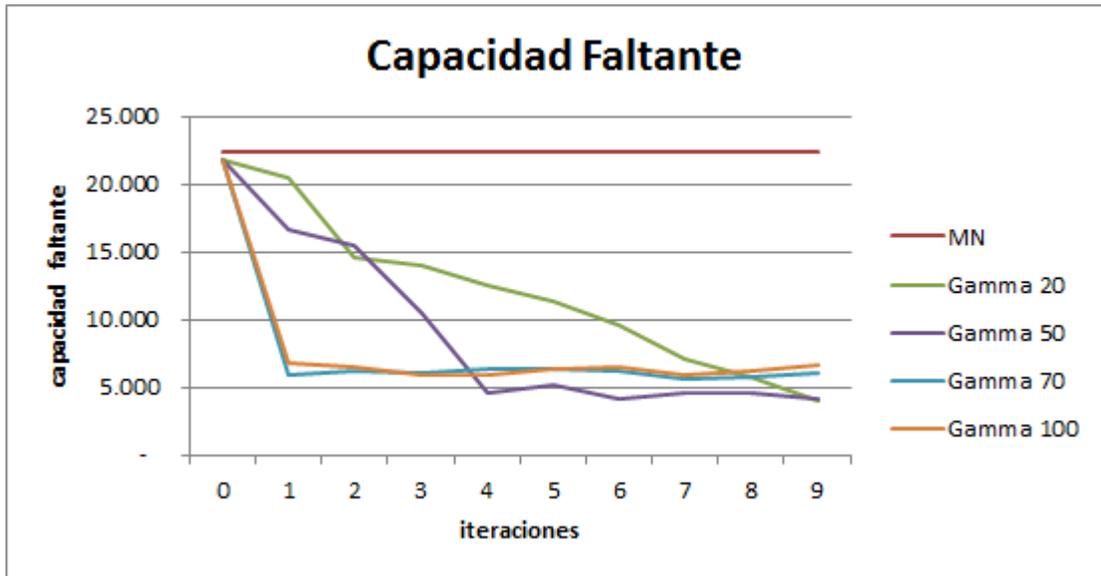


FIGURA 6.7. Evolución de capacidad faltante por número de iteraciones para diferentes valores de γ

6.1.5. Evolución γ vs costos infactibilidad

Se puede observar un comportamiento bastante similar al observado en los porcentajes infactibles y capacidad faltante. Esto se ocasiona por el hecho que los costos de infactibilidad se encuentran fuertemente correlacionados a los valores de estos. Al igual que en los casos anteriores, los costos de infactibilidad de las soluciones para las diferentes iteraciones de $\gamma = 0$ no presentan diferencias. Para el resto de los γ existe un comportamiento similar al observado en la Figura 6.1.3, en donde a excepción de los resultados de $\gamma = 20$, se aprecia una relativa tendencia a estabilizarse a partir de la cuarta iteración. Estos datos son presentados en la Figura 6.1.5 y se resumen en la Tabla 6.6.

TABLA 6.6. Evolución de costos de infactibilidad por número de iteraciones para diferentes valores de γ

Modelo	Iteraciones	MN	$\gamma = 20$	$\gamma = 50$	$\gamma = 70$	$\gamma = 100$
	0	44.208	44.242	44.242	44.242	44.242
	1	44.208	42.247	34.711	13.486	16.290
	2	44.208	33.624	34.116	14.626	15.656
	3	44.208	32.320	24.935	14.170	14.462
	4	44.208	30.638	12.283	14.230	14.341
	5	44.208	28.783	12.641	14.663	14.327
	6	44.208	24.550	11.050	14.021	15.132
	7	44.208	18.658	11.809	13.495	14.134
	8	44.208	15.509	11.598	13.938	14.850
	9	44.208	11.003	10.568	13.791	15.226

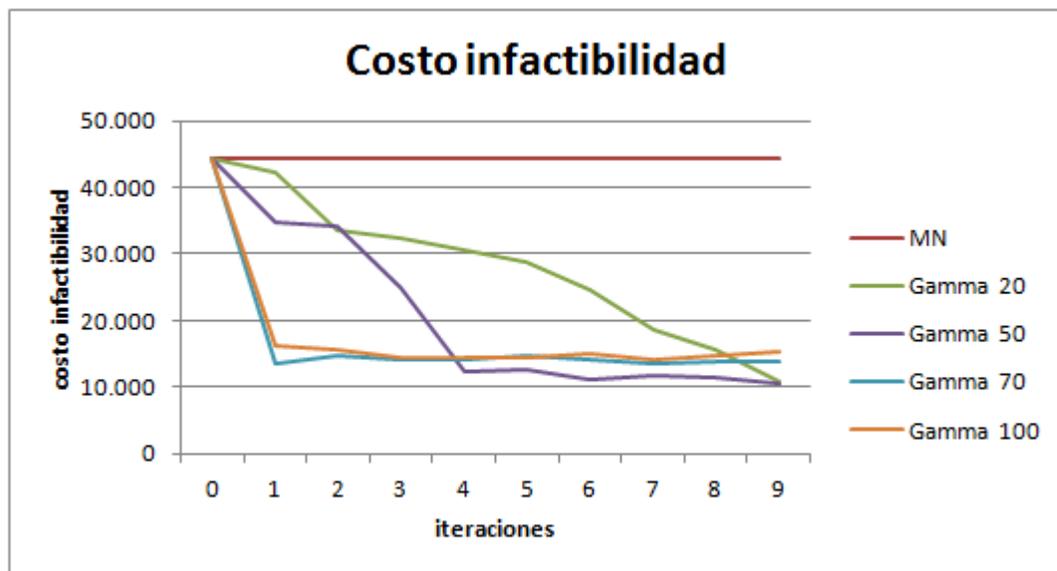


FIGURA 6.8. Evolución de costos de infactibilidad por número de iteraciones para diferentes valores de γ

Estas reducciones conjuntas del porcentaje infactible, la capacidad faltante y de los costos de infactibilidad nos hacen notar los efectos que la modelación propuesta genera. Se

puede apreciar como a medida que aumentan el número de iteraciones, para cualquiera que fuese el presupuesto de incertidumbre γ utilizado, cómo el modelo se va tornando cada vez más robusto. De esta forma, este mayor robustecimiento permite disminuir las cantidades de ocurrencias en donde se estaría sobrepasando las capacidades reales de almacenamiento de las bodegas junto con los volúmenes asociados a estas, y por consecuencia, reduciendo los costos que aquellos excesos implican.

6.1.6. Evolución γ vs beneficios totales

De modo de aunar los conceptos anteriormente descritos, se plantea el concepto de los beneficios totales. Mediante los beneficios totales se cuantifican en un único indicador los resultados de los parámetros anteriores, en donde adicionalmente se incluyen los ingresos percibidos, los costos operacionales y los costos de pérdida de calidad. Estos datos son presentados en la Figura 6.1.6 y se resumen en la Tabla 6.7.

TABLA 6.7. Evolución de beneficios totales por número de iteraciones para diferentes valores de γ

Modelo	Iteraciones	MN	$\gamma = 20$	$\gamma = 50$	$\gamma = 70$	$\gamma = 100$
	0	469.503	469.468	469.468	469.468	469.468
	1	469.503	471.429	478.444	498.976	496.215
	2	469.503	479.673	478.986	497.793	496.640
	3	469.503	480.884	487.661	498.243	497.807
	4	469.503	482.374	499.841	498.179	497.923
	5	469.503	484.065	499.445	497.735	497.914
	6	469.503	487.986	501.014	498.358	497.105
	7	469.503	493.631	500.247	498.881	498.102
	8	469.503	496.684	500.456	498.408	497.387
	9	469.503	501.050	501.447	498.521	497.011

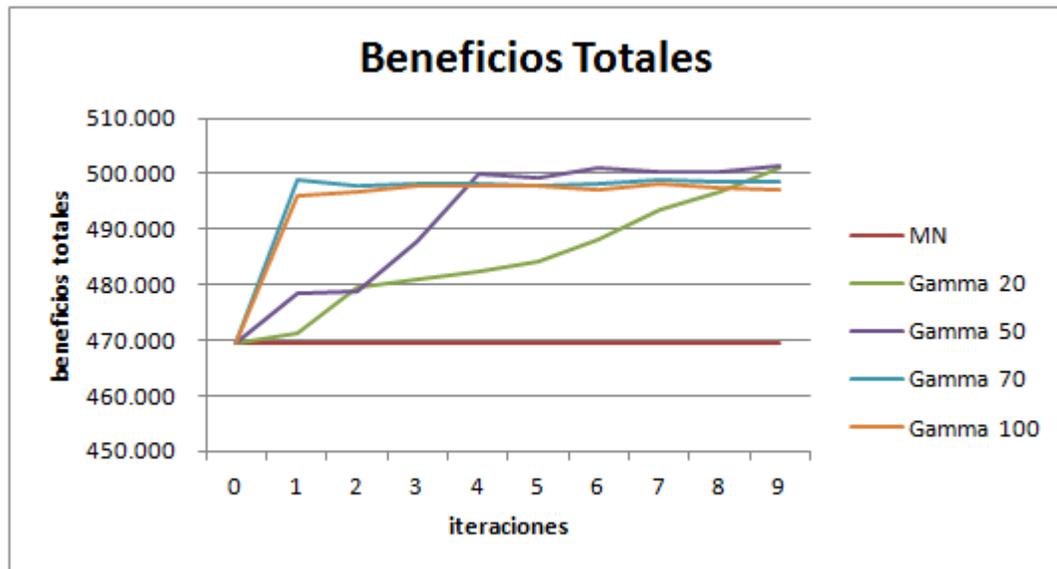


FIGURA 6.9. Evolución de beneficios totales por número de iteraciones para diferentes valores de γ

De manera equivalente a los casos anteriores, los beneficios totales de las soluciones propuestas en las diferentes iteraciones de $\gamma = 0$ no presentan diferencias, tal como era de esperarse. Para el resto de los γ existe un comportamiento similar al observado en el porcentaje infactible 6.1.3, en donde se aprecia una relativa tendencia a estabilizarse a partir de la cuarta iteración. Cabe mencionar que a excepción de los resultados del MN, los beneficios de todos los modelos tienden a ser bastante similares a partir de la novena iteración, en donde el margen de diferencia entre los valores más extremos es de solo un 0.5%, alcanzándose los mayores beneficios en el modelo de $\gamma = 50$ durante su novena iteración.

6.1.7. Evolución γ vs tiempos de resolución

Finalmente se analizaron los tiempos de resolución de los modelos, los cuales contemplan los tiempos de ejecución del solver junto con los tiempos de evaluación de los resultados. Estos tiempos corresponden a un parámetro bastante sensible, ya que por lo general los administradores de las viñas se ven constantemente obligados a tomar decisiones de una

manera rápida, por lo que un modelo que se demore excesivamente en entregar soluciones se transformaría en un modelo que no podría ser utilizado en la realidad.

TABLA 6.8. Evolución de tiempos totales de resolución por número de iteraciones para diferentes valores de γ

Modelo	Iteraciones	MN	$\gamma = 20$	$\gamma = 50$	$\gamma = 70$	$\gamma = 100$
	0	197	129	129	128	128
	1	394	744	668	614	468
	2	591	1.376	1.297	1.116	663
	3	789	2.008	1.912	1.640	866
	4	986	2.649	2.529	2.197	1.047
	5	1.183	3.289	3.184	2.746	1.259
	6	1.380	3.933	3.841	3.285	1.441
	7	1.577	4.580	4.497	3.841	1.633
	8	1.774	5.223	5.156	4.473	1.831
	9	1.971	5.874	5.817	5.074	2.035

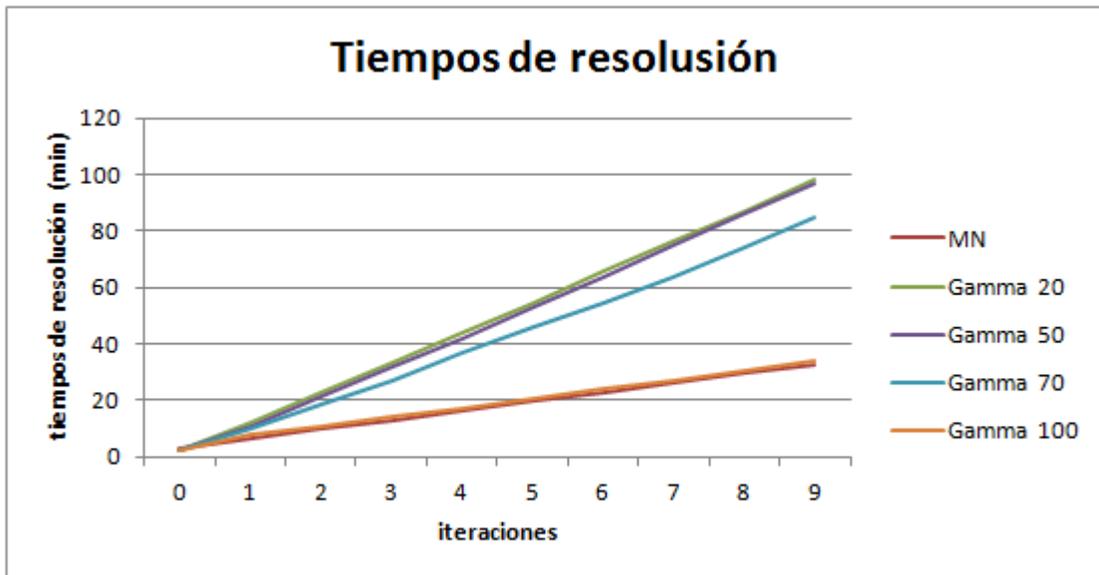


FIGURA 6.10. Evolución de tiempos totales de resolución por número de iteraciones para diferentes valores de γ

De la Tabla 6.8 se puede observar como el MN es el que presenta los menores tiempos de resolución en cada segmento de número de iteraciones. Luego existe una relación directa entre los tiempos de resolución y la cantidad de iteraciones, aumentando de manera lineal junto con el número de iteraciones en cada uno de los modelos de γ considerados. A su vez, para una misma cantidad de iteraciones, los tiempos de resolución decrecen de manera de manera consistente para mayores valores de γ utilizado, reflejando una directa correlación entre el nivel de robustecimiento y los tiempos de resolución.

6.2. Modelo seleccionado

En base a los resultados observados en la Sección 6.1.6, se ha optado por utilizar un modelo de $\gamma = 100$ con 4 iteraciones. Los principales argumentos en la selección de este modelo se basan en el hecho de la relativa baja diferencia en los valores de los criterios planteados en la Sección 6.1.2, en donde todos ellos, a excepción de los tiempos totales de resolución, hacen que el modelo de $\gamma = 100$ y de 4 iteraciones entregue soluciones robustas en tiempos inferiores a las 4 horas de ejecución.

TABLA 6.9. Comparación MN, $\gamma = 50$ y $\gamma = 100$

Modelo	MN	$\gamma = 50$	$\gamma = 100$
Beneficio	469.503	501.447	497.923
Valor FO	513.711	512.015	512.264
Porcentaje infactible	40,10	8,26	12,00
Capacidad faltante	22.309	4.176	5.880
Costos operacionales	257.947	289.312	289.431
Costos pérdida calidad	23.292	25.870	25.502
Costos infactibilidad	118.641	10.568	14.341
Tiempos CPU	44,7 seg	96,94 min	17,44 min

En particular, los beneficios del modelo seleccionado son un 6,05% superiores a los del MN, y un 0,7% inferiores a los del modelo de mayores beneficios totales, el modelo

de $\gamma = 50$ con 9 iteraciones. En cambio, los tiempos totales de resolución son un 455,8% superiores en el caso del modelo de mayores beneficios totales, lo que se traduce en una diferencia de 79,5 minutos entre un modelo y otro. Dentro del análisis realizado en este trabajo, los tiempos de resolución corresponden a un parámetro primordial dentro del enfoque operacional que se busca abordar, por lo cual se consideró que los beneficios de un aumento de un 0,7% en los beneficios totales no compensaban el aumento de 79,5 minutos en la resolución del modelo que implicaría utilizar el modelo de máximos beneficios.

A modo de simplicidad en las posteriores secciones, el modelo anteriormente mencionado, modelo de $\gamma = 100$ y 4 iteraciones, se le denominará como *modelo seleccionado*. Este modelo será utilizado como base en los posteriores análisis desarrollados en este trabajo.

7. ANÁLISIS NUMÉRICOS

Este capítulo presenta un análisis respecto de diversas variantes aplicadas sobre el *modelo seleccionado* (MS). Se determinarán los cambios ocasionados a las estructuras de las soluciones mediante diferencias en las relevancias y pesos asociados a los factores de la función de pérdida de calidad. Del mismo modo, se determinarán los cambios existentes producto de variaciones en los niveles de incertidumbre asociados a los tiempos de fermentación. Se plantearán situaciones hipotéticas, en donde se demostrará como mediante pequeños cambios a la formulación planteada en el MS, se pueden analizar los costos y beneficios de la inclusión de nuevas tecnologías o enfoques que se deseen adoptar.

7.1. Aumento factores función pérdida de calidad

Existe un largo debate entre los administradores de las viñas y los enólogos respecto de que es lo que se debiese privilegiar a la hora de realizar la planificación de las cosechas. Desde el punto de vista de los administradores, lo esencial es generar una planificación que permita maximizar los beneficios totales, optimizando el uso de los recursos y reduciendo la totalidad de los costos. En cambio, los enólogos plantean que las cosechas debiesen planificarse de tal forma que las calidades finales del vino sean óptimas, ya que gran parte del prestigio de las viñas depende de eso. Esta disyuntiva ocasiona que la planificación de una temporada de cosechas se transforme en un problema de multiobjetivos, en donde por un lado se encuentran los ingresos y costos operacionales, y del otro los costos asociados a la función de pérdida de calidad.

A modo de analizar los efectos que tienen estos factores en las soluciones propuestas por el modelo, se plantea generar escenarios para los cuales la función de pérdida de calidad tome mayor o menor preponderancia, generando soluciones que puedan privilegiar los distintos puntos de vista existentes. Utilizando como base la función objetivo planteada en el PM, se realizó una pequeña modificación al incorporar un parámetro de relevancia para la función de pérdida de calidad, el parámetro A.

$$\begin{aligned}
\max \quad & \underbrace{\sum_{t,j,p,v} (1 - A \cdot F_{j,t}) P_j X_{p,t,j,v}}_{F1} - \underbrace{\sum_{t,j,p} BE \cdot X_{p,t,j,EX}}_{F2} \\
& - \underbrace{\sum_{t,j} CMO \cdot N_{t,j}}_{F3} - \underbrace{\sum_{t,j} CM \cdot MA_{t,j}}_{F4} - \underbrace{\sum_t CC \cdot NC_t}_{F5} \\
& - \underbrace{\sum_t CD \cdot ND_t}_{F6}
\end{aligned} \tag{7.1}$$

La función objetivo planteada en la ecuación 7.1 fue la utilizada para analizar este problema, en donde mediante el parámetro A se regula el factor de relevancia de la pérdida de calidad dentro de las soluciones. En la Tabla 7.1 se presentan las diferentes variantes analizadas.

TABLA 7.1. Variación de preponderancia de la función de pérdida de calidad

Modelo	Valor parámetro A
Modelo 2A	2
Modelo 1.5A	1.5
Modelo 1A	1
Modelo 0.5A	0.5
Modelo 0A	0

Cabe mencionar que el modelo que utiliza un valor de $A = 1$ es análogo a la formulación del MS. De esta forma, los modelos con un valor más elevado del parámetro A tenderán a favorecer la visión de los enólogos, generando soluciones que privilegien la reducción de los costos de calidad por sobre los costos operacionales. Del mismo modo, los modelos con un valor más reducido del parámetro A tenderán a favorecer la reducción de los costos operacionales por sobre los costos de pérdida de calidad.

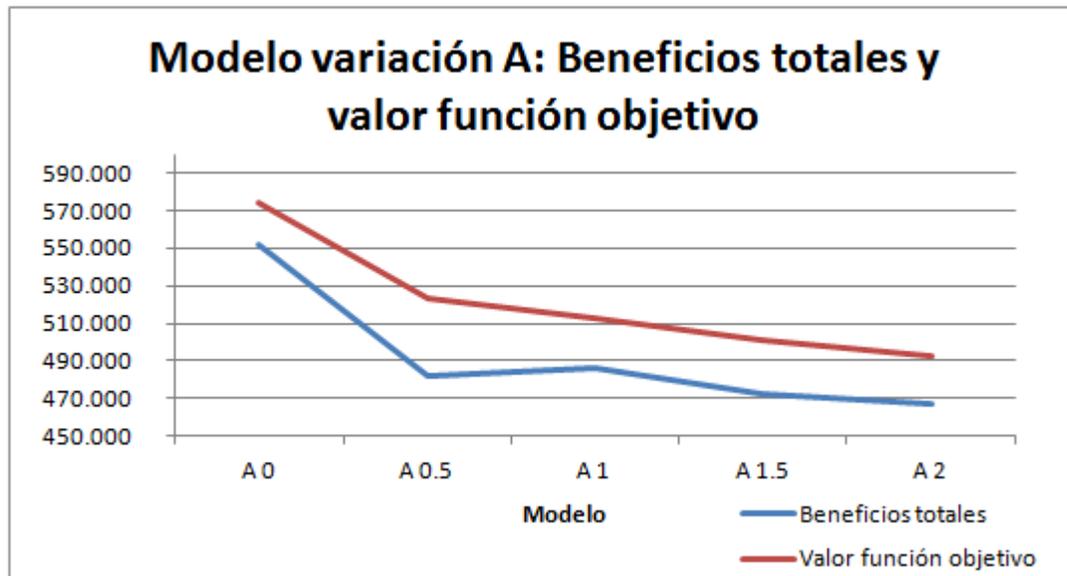


FIGURA 7.1. Modelos variación A: Beneficios totales y valor función objetivo

De la Figura 7.1 se puede observar que existe un aumento en los beneficios totales a medida que se reduce el valor del parámetro A . Esto no es sorpresa, ya que en particular, toda solución factible de cualquiera de los modelos, lo es también para el resto de ellos. Con lo cual, al existir un menor castigo en cuanto a la función de pérdida de calidad, en caso de evaluar la misma planificación en los diferentes modelos, siempre se obtendrán mayores beneficios en los modelos de menor valor del parámetro A .

No obstante, las soluciones propuestas por cada uno de los modelos no tienen por qué ser iguales entre sí. En particular, esto es fácilmente demostrado por la estructura observada en la Figura 7.1. En esta se presenta un resumen de las cantidades totales cosechadas en cada período de tiempo, en donde se puede observar una clara diferencia entre las planificaciones de cada modelo. Con ello, las diferencias existentes en los beneficios totales no sólo obedecen al aumento del peso de los costos de calidad, sino que a un cambio en la planificación seleccionada. Adicionalmente de la Figura 7.1, se puede apreciar que para valores reducidos del parámetro A , las cosechas tienden a redistribuirse en el horizonte de tiempo. Lo anterior es ocasionado por el hecho de que al verse reducido el castigo asociado a la pérdida de calidad, las soluciones propuestas por los modelos tienden a realizar un uso

más eficiente de los recursos escasos como lo son el personal contratado. De esta forma se genera una reducción en las cantidades de trabajadores utilizados en los períodos de mayor, reduciendo de esta forma los costos operacionales.

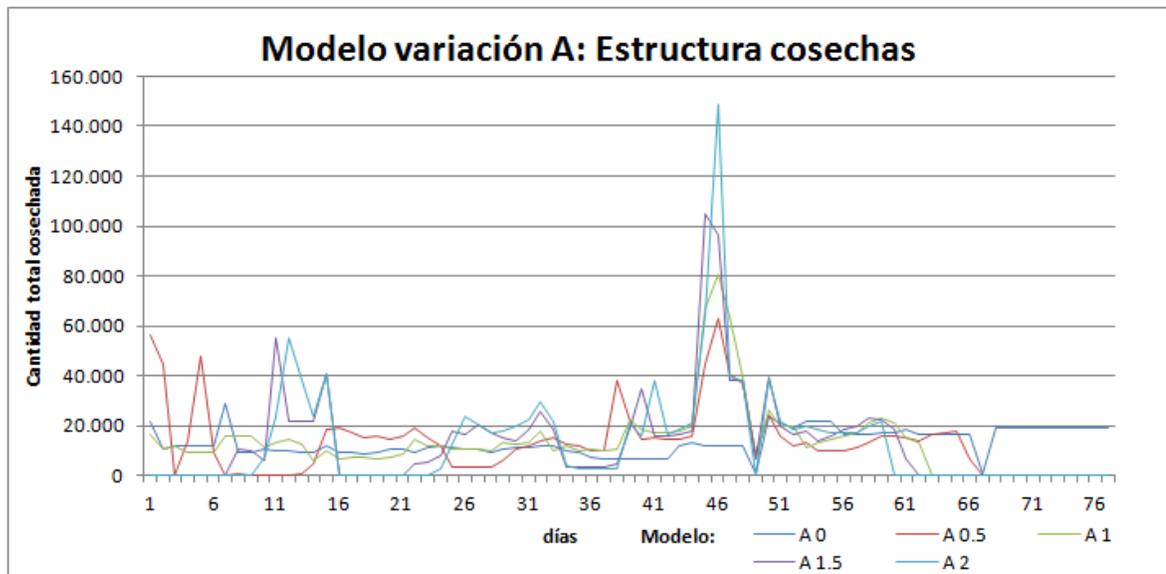


FIGURA 7.2. Modelo variación A: Estructura cosechas

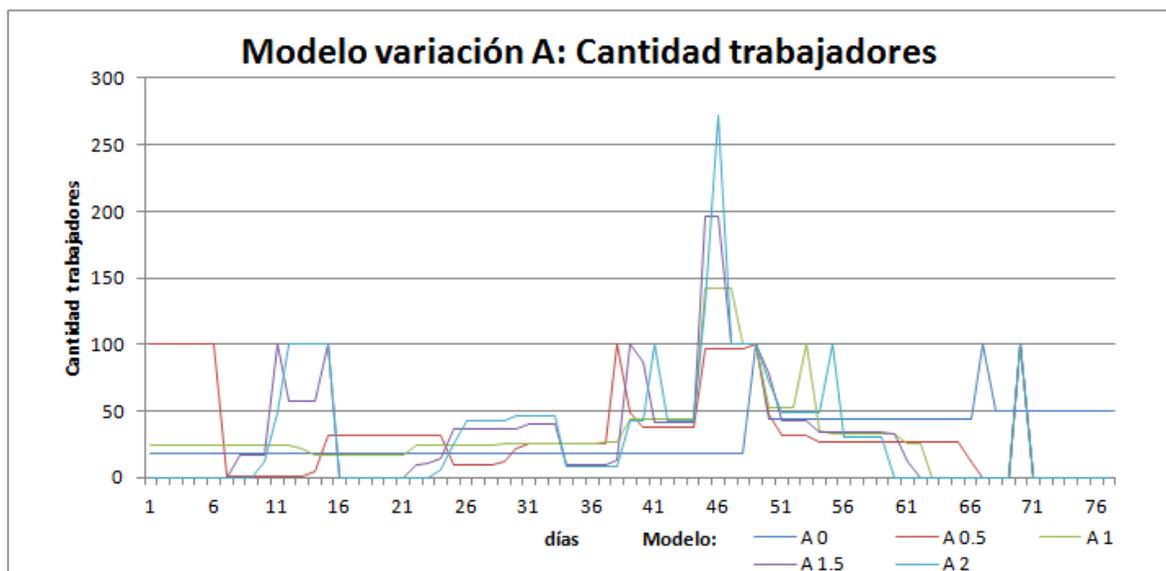


FIGURA 7.3. Modelo variación A: Cantidad trabajadores

De manera análoga, aumentos en los valores del parámetro A generan una concentración de las soluciones en torno a los días óptimos de cosecha, llegando al extremo que para cuando los valores de A son excesivamente altos, $A = 100$, el modelo indicará que únicamente se cosechen las cantidades necesarias de modo de cumplir con las cuotas mínimas establecidas por las restricciones de demanda de cada tipo de cepa. Con ello, producto del elevado costo asociado a la pérdida de calidad que se generarían, las cosechas únicamente son realizadas en los días óptimos establecidos por la función de pérdida de calidad. De esta forma, dado el alto volumen de cosechas en aquellos días, se estará obligado a recurrir a bodegas externas, generando así mayores costos operacionales producto de los costos de maquila.

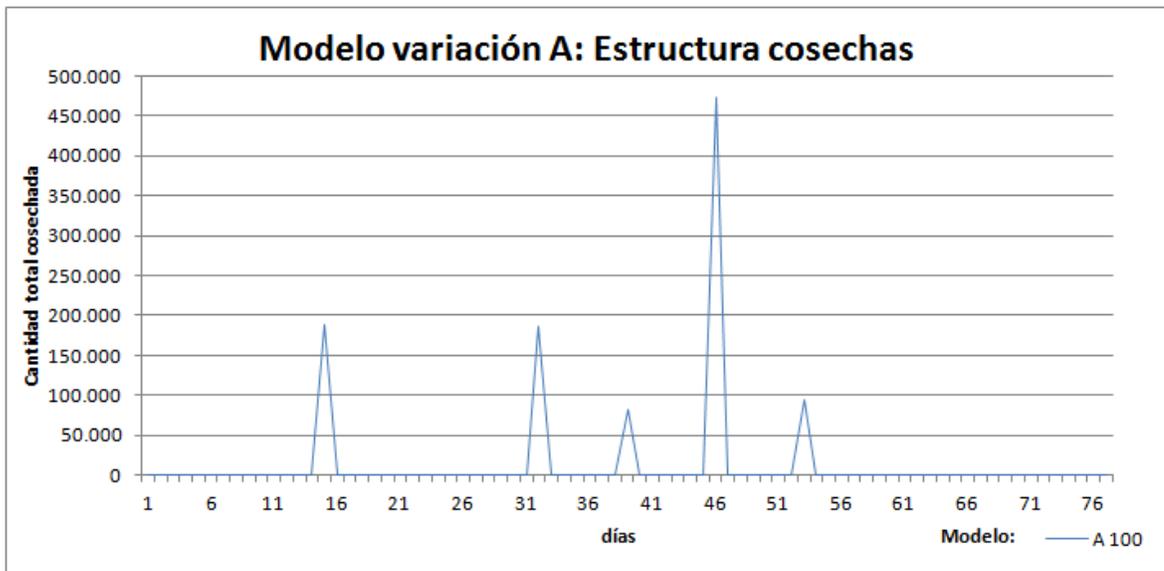


FIGURA 7.4. Modelo variación A 100: Estructura cosechas

Por lo tanto, dependiendo del enfoque que desee adoptar la viña, este podrá ser regulado a través del parámetro A . Valores reducidos del parámetro A generarán soluciones más enfocadas a la maximización de los beneficios totales, reduciendo la relevancia existente en los costos de pérdida de calidad si es que estos pueden ser contrarrestados con una disminución superior en los costos operacionales. En cambio, valores elevados del parámetro

A generarán soluciones más alineadas con el enfoque planteado por los enólogos, en donde se prioriza la calidad final de los vinos antes que la reducción de costos.

TABLA 7.2. Resumen resultados modelos variación A

Modelo	A 0	A 0.5	A 1	A 1.5	A 2
Beneficios totales	552.242	482.438	485.984	472.609	467.497
Porcentaje infactible	18,53	36,69	23,46	22,60	18,05
Capacidad faltante	9.337	22.409	12.136	15.352	13.247
Costos infactibilidad	21.907	40.841	27.029	28.204	24.975
Valor función objetivo	574.148	523.280	513.014	500.812	492.472
Costos pérdida calidad	419.406	46.294	24.873	15.349	12.086
Costos operacionales	253.049	280.771	289.311	303.362	310.666

7.2. Reducción de incertidumbre

A lo largo del tiempo, la industria del vino ha desarrollado nuevos equipamientos, tecnologías y recursos que permiten medir con mayor exactitud diversos factores que son relevantes en los procesos de fermentación de vinos, como lo son las temperaturas internas de los mostos durante la fermentación alcohólica, los niveles de anhídrico carbónico (CO_2), altura del mosto al interior de las cubas, y diversos otros factores. Sin embargo, muchas de estas tecnologías implican el desembolso de importantes sumas de dinero para poder ser implementadas, en donde los beneficios que reportan pueden ser cuestionadas. Es por ello que una pregunta relevante que existe a la hora de tomar decisiones son los beneficios que se pueden esperar a partir de la modificación de ciertos procesos, y contrastarlas con los costos que estas significan. A través de un análisis numérico se propone medir cuales serían los beneficios en caso que efectivamente una nueva tecnología permitiese reducir los niveles de incertidumbre de ciertos parámetros. Para ello se elaboraron diferentes pruebas de control que permitiesen medir los reales efectos que implicarían las reducciones de incertidumbre. Se utilizará como base de estos análisis el modelo seleccionado en la Sección 6.2, al cual se le aplicarán diversas variantes de modo de replicar los efectos propuestos.

Según diversos estudios realizados, se ha planteado la posibilidad de que mediante la inclusión de sensores de temperatura al interior de los depósitos de maceración se podrían tomar medidas correctivas en los procesos de fermentación de las cosechas. Estas permitirían generar un resguardo para los procesos mismas de estas, en donde se podría asegurar que las temperatura de los mostos se mantuviesen dentro de unos rangos óptimos establecidos. Los autores planteaban que un mejor manejo de la temperatura de los mostos permitiría reducir considerablemente la incertidumbre existente en los tiempos totales de fermentación, pudiendo predecir con mayor exactitud cuales serían las fechas reales de término de estas.

7.2.1. Reducción de rangos máximos de variabilidad

Una forma de afrontar la reducción de incertidumbre planteada, consistiría en una reducción de la variabilidad máxima asociada a cada uno de los parámetros sujetos a incertidumbre, en este caso, en las probabilidades promedios de los tiempos de término de las fermentaciones, $\hat{\alpha}$. El objetivo de este análisis corresponde a cuantificar los posibles beneficios esperados en caso de implementar tecnologías que permitiesen reducir los rangos máximos de variabilidad de los parámetros $\hat{\alpha}$. Se evaluaron los resultados de reducciones de un 20%, 40%, 60% y 80% respectivamente en los valores máximos permitidos de variación. Se generaron 100 escenarios de evaluación, en donde los valores de los α fueron construidos mediante distribuciones uniforme. Se tomó como base la variabilidad utilizada en el MS de la Sección 6.2, el cual considera que los valores de α pueden variar hasta en un 50% desde su valor promedio, $\bar{\alpha}$.

$$\alpha_{n,v,t,j}^* = \bar{\alpha}_{n,v,t,j} + \bar{\alpha}_{n,v,t,j} \cdot U \quad (7.2)$$

TABLA 7.3. Modelos reducción de variabilidad máxima de incertidumbre

Modelo	Distribución utilizada
Var 50%	$U \sim [-0.5, 0.5]$
Var 40%	$U \sim [-0.4, 0.4]$
Var 30%	$U \sim [-0.3, 0.3]$
Var 20%	$U \sim [-0.2, 0.2]$
Var 10%	$U \sim [-0.1, 0.1]$
Var 0%	$U \sim [0, 0]$

Los modelos de variación 0% y 50% son análogos a los del modelo MN y MS planteados en el Capítulo 6 y en la Sección 6.2 respectivamente. En particular, el modelo de variación 0% es análogo al MN por el hecho que al no existir variabilidad, la resolución de este modelo carece de sentido que sea a través del problema adversario. Esto producto de que el problema adversario no podrá generar ninguna solución distinta del caso trivial, o sea de una solución en donde sus variables sean iguales a 0, con lo que no se afectará a ninguno de los parámetros del PM.

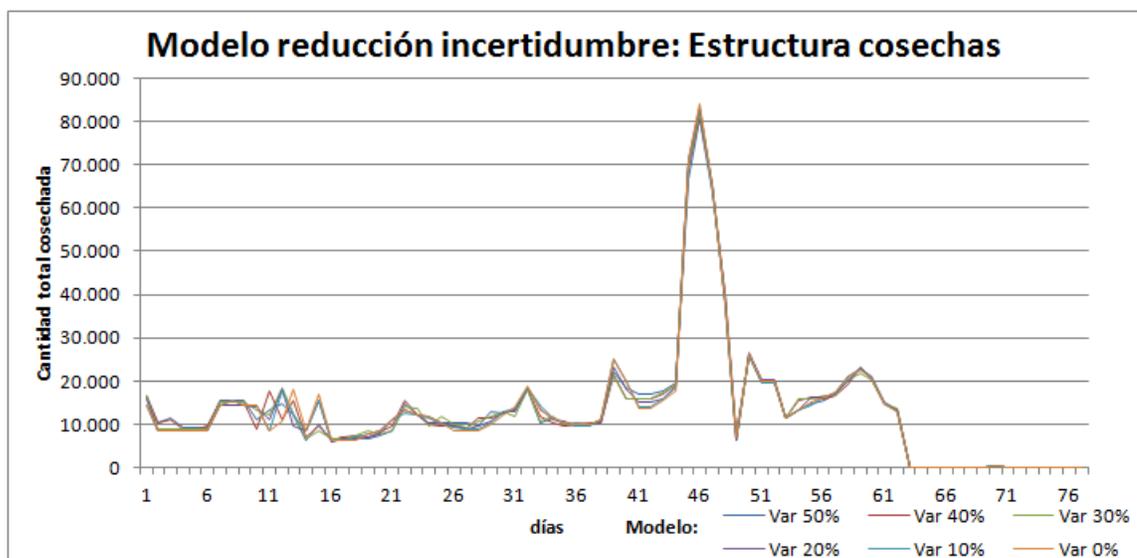


FIGURA 7.5. Modelos reducción variabilidad máxima: Estructura cosechas

Al existir modelos que asuman un menor grado de variabilidad en los tiempos de fermentación, estos pueden permitirse generar una planificación que concentre de mayor forma las cosechas en torno a los días óptimos de cosecha. Esto se debe a que al existir un menor riesgo de que las capacidades de las bodegas puedan verse sobrepasadas producto de los efectos de la incertidumbre, el modelo pueda optar a generar mayores eficiencias en el uso del personal contratado, como también a reducir un poco más los costos asociados a la pérdida de calidad.

TABLA 7.4. Resumen resultados modelos reducción variabilidad máxima

Modelo	Var 50%	Var 40%	Var 30%	Var 20%	Var 10%	Var 0%
Beneficios totales	485.984	483.824	484.771	486.560	486.728	513.711
Porcentaje Infactible	23,46	25,38	25,34	23,41	22,95	0
Capacidad Faltante	12.136	9.976	7.562	4.434	2.238	0
Costos infactibilidad	27.029	29.415	28.612	26.934	26.880	0
Valor función objetivo	513.014	513.239	513.383	513.494	513.608	513.711
Costos pérdida calidad	24.873	24.702	24.493	23.736	23.498	23.292
Costos operacionales	289.311	289.256	289.322	289.968	290.091	290.194

De la Tabla 7.4 se puede apreciar que a medida que se reduce la variabilidad máxima, las soluciones de los modelos se acercan cada vez más hacia las propuestas por las del MN, o sea a las de un modelo sin incertidumbre. Esto es explicado por el hecho que en las sucesivas iteraciones entre el PM y PA, entre mayor fuese la reducción de la variabilidad esperada del parámetro $\hat{\alpha}$, menores diferencias se observarían entre las soluciones de sus respectivas iteraciones. Con lo cual, al existir un menor margen de variación de los parámetros α , las soluciones factibles del PA se verían cada vez más acotadas, y por ende una menor influencia podría ejercer el PA sobre las soluciones del PM. El beneficio de la reducción de incertidumbre alcanza su valor máximo con el modelo de variación 0%, el cual se diferencia en 27.727 con respecto a los beneficios totales del modelo de 50% de variación. Ante esto, el margen máximo de mejora que se puede optar utilizando tecnologías que reduzcan únicamente los rangos máximos de incertidumbre es de un 5.7%. Sin

embargo, una reducción de un 100% de la incertidumbre en las probabilidades de término de los tiempos de fermentación es prácticamente imposible, por lo que los beneficios de este tipo de tecnología se debiesen esperar por debajo de este margen.

7.2.2. Reducción de cantidad de días factibles

Un segundo enfoque hacia la reducción de incertidumbre se plantea hacia la reducción de la cantidad de días para los cuales se puede esperar que las cosechas de cada tipo puedan terminar sus períodos de fermentación. Esto puede ser entendido como que para cada tipo de uva, las probabilidades de término de los períodos de fermentación se distribuyen en una menor cantidad de días, aumentando así el valor de la probabilidad de término en los días restantes. Este efecto fue modelado mediante el parámetro α , en donde la reducción de días factibles para el término de las cosechas es representado mediante una menor cantidad de días para los cuales el parámetro α toma un valor distinto de 0, aumentando proporcionalmente el valor de los días restantes de acuerdo a la estructura definida en las Figuras 2.1.3 y 2.1.3 respectivamente. Se midieron los efectos de la reducción de los días factibles de término de los períodos de fermentación mediante una reducción equivalente al 10%, 20%, 30% y 40%. En las Figuras 7.2.2 y 7.2.2 se presenta una comparación de los valores utilizados en los parámetros α para los modelos de reducción de un 0 y 40% respectivamente, tanto para el caso de las cepas de vino blanco como para las de vino tinto.

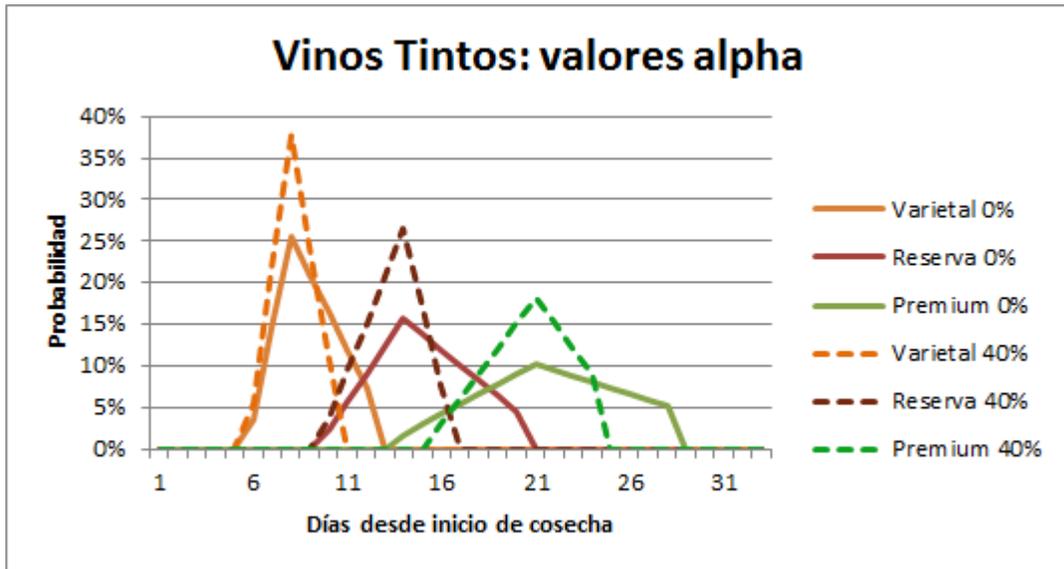


FIGURA 7.6. Vinos Tintos: Comparación valores α modelos de 0% reducción y 40% reducción

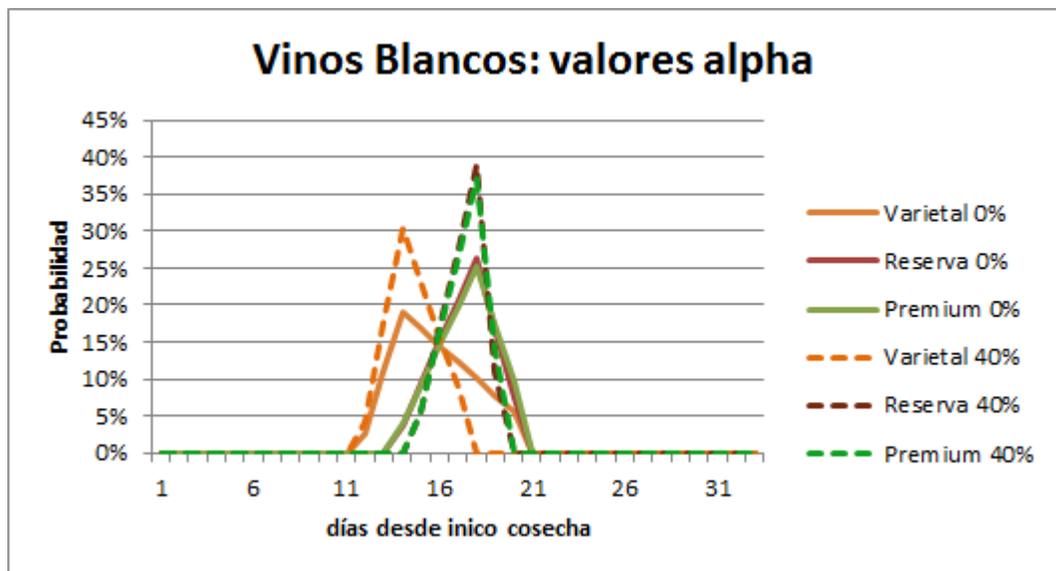


FIGURA 7.7. Vinos Tintos: Comparación valores α modelos de 0% reducción y 40% reducción

Los soluciones propuestas por parte del modelo de 0% de reducción son análogas con las del modelo seleccionado en la Sección 6.2. De la Figura 7.2.2 se puede apreciar como la reducción de los días factibles influye directamente en la estructura de las soluciones, en

donde a menor cantidad de días factibles, mayor concentración se observa en torno a los días óptimos de cosecha para cada tipo de cepa. En el caso más extremo, en el cual existe un único día para el término de los períodos de fermentación, es donde se pueden apreciar las mayores concentraciones.

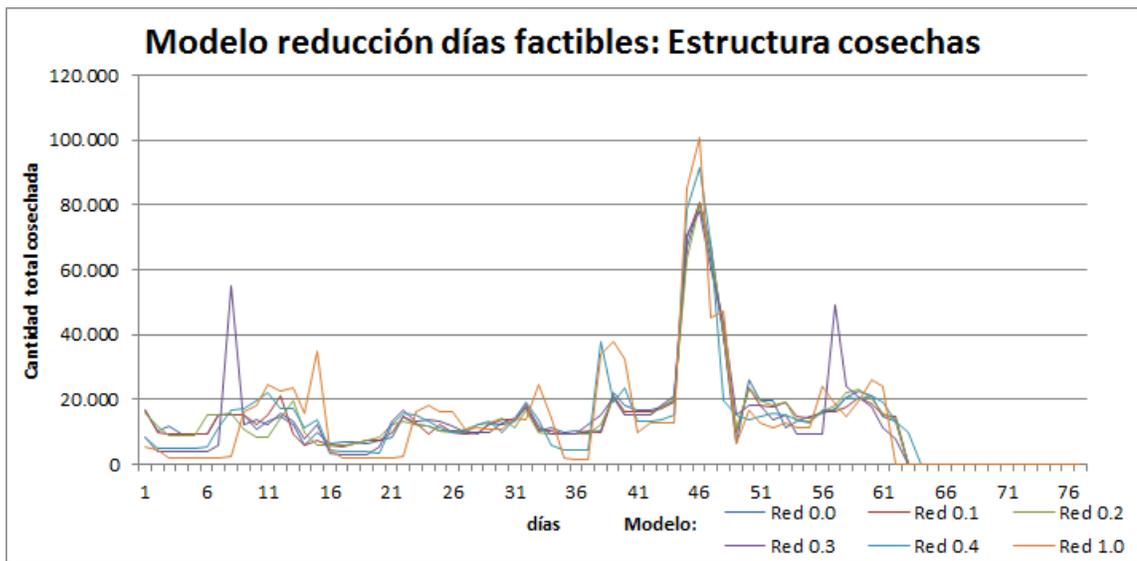


FIGURA 7.8. Modelos reducción días factibles: Estructura cosechas

Producto de esta mayor concentración en torno a los días óptimos de cosecha es que se generan reducciones en los costos de pérdida de calidad. En particular, al existir un único día para el término de los períodos de fermentación, el modelo alcanza los mayores ahorros respecto de estos costos, alcanzandose una disminución de hasta un 25,54% en comparación de los resultados del modelo de 0% de reducción. Sin embargo, este aumento en las concentraciones de las soluciones genera un impacto respecto de los indicadores de los porcentajes infactibles como también de la capacidad faltante, aumentando por consiguiente los costos de infactibilidad.

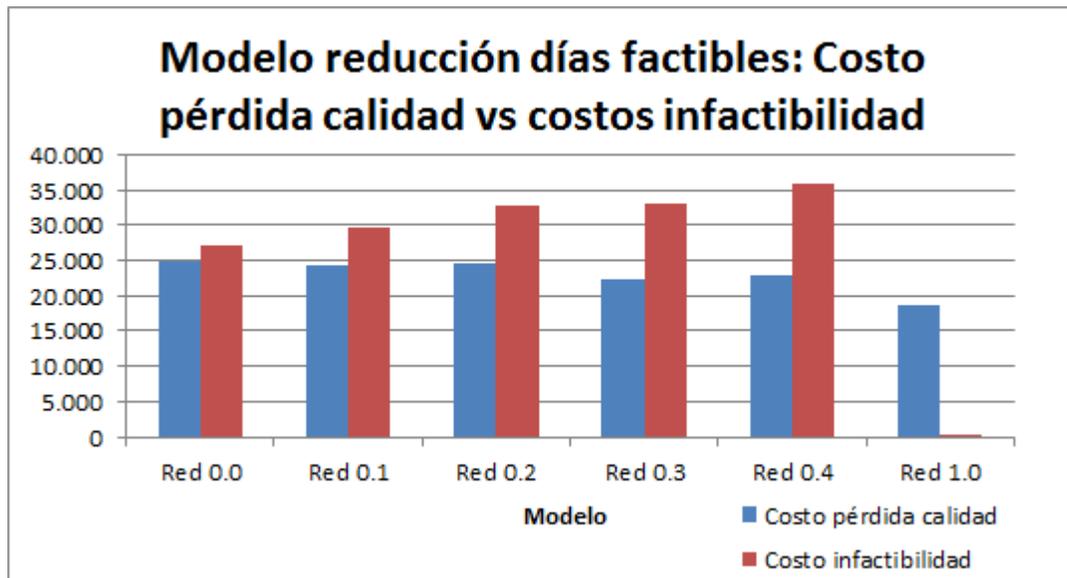


FIGURA 7.9. Modelos reducción días factibles: Comparación costos pérdida calidad vs costos infactibilidad

Esto es ocasionado por el hecho de que al existir una mayor concentración en las planificaciones de las cosechas, los efectos de la variabilidad en los tiempos de fermentación repercuten de una mayor forma, ya que estos impactan a un mayor número de cosechas. Es por ello que los problemas de capacidad pueden verse acrecentados si es que estas variaciones de retardo se presentan en los momentos que la planificación indica que se realizarán las cosechas de mayores volúmenes, ya que de acuerdo a la planificación realizada, el modelo asume que para esos períodos se dispondrá de capacidad suficiente para recepcionar aquellas cosechas. Sin embargo, la incertidumbre respecto de los tiempos de fermentación puede generar que la capacidad real se vea limitada por cosechas que sobrepasaron los tiempos estimados en sus períodos de fermentación, debiendo por lo tanto recurrir al uso de bodegas externas para poder suplir la capacidad faltante.

TABLA 7.5. Resumen resultados modelos ante reducción de días factibles de fermentación

Modelo	Red 0.0	Red 0.1	Red 0.2	Red 0.3	Red 0.4	Red 1.0
Beneficios totales	485.984	485.799	483.522	483.413	480.247	515.233
Porcentaje infactible	23,46	25,92	30,15	25,55	29,17	0
Capacidad faltante	12.136	13.708	14.585	12.966	14.083	0
Costos infactibilidad	27.029	29.556	32.900	33.010	35.941	0
Valor función objetivo	513.014	515.354	516.422	516.423	516.187	515.233
Costos pérdida calidad	24.873	24.205	24.568	22.330	22.782	18.770
Costos operacionales	289.311	287.638	286.208	288.557	288.228	293.307

No obstante, estos efectos no fueron observados en el modelo de 100% de reducción, ya que al existir un único día para que las cosechas finalicen sus períodos de fermentación el modelo se transformaba en un problema determinístico, eliminando cualquier posible efecto asociado a los efectos de incertidumbre. Por ende una tecnología que permitiese reducir el espectro de días factibles para la duración de los períodos de fermentación tendría como tope de aumento de los beneficios de un 6.01%, pero únicamente si a la vez se limita la variabilidad máxima, ya que de lo contrario todos los posibles ahorros que se generen a través de la reducción de los costos de pérdida de calidad se verán opacados por el aumento en los costos de infactibilidad.

8. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Los resultados obtenidos a lo largo de este trabajo demuestran que los tiempos de fermentación son un parámetro relevante para la estructura de las soluciones en la planificación de una temporada de cosecha de un viña. Esto es demostrado en los resultados obtenidos en la Sección 3.3.2, en donde la omisión de los tiempos de fermentación ocasionan la aparición de importantes costos denominados como costos de infactibilidad. Estos costos son asociados a las cosechas que no podrían ser recepcionadas en las bodegas propias producto de una falta de capacidad, debiendo enviar estas últimas hacia un proceso de maquila. Con lo cual, al incluir en la evaluación los costos de infactibilidad, las soluciones del *modelo nominal* otorgan beneficios que se encuentran un 16,2% por sobre a los del *modelo sin fermentación*. Estos resultados permiten validar la hipótesis inicial acerca de la relevancia de los tiempos de fermentación en la planificación de una cosecha de vinos.

Sin embargo, estos resultados fueron elaborados considerando un escenario en donde los valores de los tiempos de fermentación se comportan de manera determinística. Al incluir los efectos de la variabilidad, los resultados del *modelo nominal* se ven reducidos en un 8,6% con la aparición de nuevos costos de infactibilidad antes no considerados en el escenario determinístico. Es por ello, que mediante una variación de las técnicas existentes de optimización robusta, se elaboró una modelación que permitiese encontrar planificaciones de cosechas las cuales se encontrasen protegidas ante los efectos de la incertidumbre en los tiempos de fermentación. Adicionalmente, la modelación propuesta logra mantener los beneficios de las modelaciones lineales, permitiendo encontrar soluciones robustas en tiempos inferiores a los 20 minutos.

Producto de la estructura de la modelación, en donde los parámetros sujetos a incertidumbre se encuentran correlacionados entre si, la modelación utilizada no permite encontrar soluciones que se encuentren protegidas completamente respecto de los efectos de la incertidumbre. No obstante, los resultados obtenidos por el *modelo seleccionado* son bastante alentadores, ya que al ser evaluados en escenarios en donde se incluyen los efectos de incertidumbre en los tiempos de fermentación, estos permiten reducir hasta en un 73,6% la

cantidad de cosechas que debiesen haber sido enviadas hacia los procesos de maquila. Lo anterior permite que se puedan generar ahorros de hasta un 87,9% en concepto de los costos de infactibilidad cuando estas son comparadas con los resultados del *modelo nominal*. Adicionalmente, se planteó la inclusión de un parámetro de ajuste respecto de la función de pérdida de calidad. Con éste, las soluciones del modelo pueden ser orientadas hacia la priorización de las cosechas para favorecer la calidad final de los vinos o hacia la disminución de los costos operacionales del proceso de cosecha.

De manera complementaria, se planteo un marco teórico para cuantificar los posibles beneficios que se podrían recibir en caso de incorporar tecnologías que redujesen los niveles de incertidumbre en los tiempos de fermentación. Se demostró que la reducción de incertidumbre permitiría generar soluciones robustas que se alineasen de mejor forma con las fechas óptimas de cosecha, generando una planificación que permitiese reducir los costos de pérdida de calidad hasta un 5.7%, si la reducción de incertidumbre proviene de una disminución de la variabilidad máxima esperada, y de un 6.01% si es que esta reducción viene acompañada de una reducción del espectro de días factibles para el término de los períodos de fermentación.

En base a los resultados observados, se recomienda la incorporación de tecnologías que permitieran la reducción de incertidumbre respecto de los tiempos de fermentación. Más allá de los beneficios teóricos planteados, como lo son la reducción de los costos de infactibilidad, estas nuevas tecnologías permitirían generar una planificación de cosechas mucho más certera, haciendo posible la realización de planes estratégicos de largo plazo. Además, la estructura del modelo posibilita que éste sea adaptado a las características de cada viña, permitiendo analizar de una manera cuantificable, en el mediano y largo plazo, los impactos que se pudiesen generar producto de la adquisición de diversos activos fijos, como lo pudiese ser la compra de nueva maquinaria, ampliación de bodegas o nuevos sistemas de cosechas que aumentasen la productividad de los trabajadores. Por lo que la utilización de un modelo como el descrito en este trabajo, le permitiría a los tomadores de decisiones de las viñas poder visualizar de una manera práctica algunas de sus decisiones y como estas repercuten en las planificaciones establecidas. Sin embargo, tal y como fue

planteado en el comienzo de este trabajo, existen diversas fuentes de incertidumbre, por lo cual es fundamental que la planificación generada a través de un modelo como el descrito sea utilizado solo como una ayuda a la toma de decisiones, y no como una descripción de los eventos a suceder.

Como trabajo futuro de esta investigación, se propone el desarrollo de un nuevo modelo que permitiese analizar la problemática de la planificación de cosechas desde un punto de vista de más dinámico, como lo es el enfoque de horizonte rodante. Este nuevo enfoque debiese permitir la realización de un seguimiento constante a la planificación, junto con la posibilidad de actualizar los valores de los parámetros de acuerdo a las situaciones observadas en el día a día, permitiendo así responder ante variaciones de las condiciones climatológicas, cambios en la estructura de precios, adquisición de nueva maquinaria, y diversos otros factores que pudiesen afectar a la planificación original una vez que ya se haya llevado a cabo parte de ella.

Adicionalmente se planteó la idea de generar un nuevo modelo que permitiese robustecer de manera conjunta los diversos parámetros sujetos a incertidumbre, en particular aquellos parámetros que ya fueron abordados en modelaciones anteriores. De esta forma se podrá obtener una solución robusta desde diferentes perspectivas de incertidumbre. No obstante, aquel tipo de modelación debiese tener presente la dimensionalidad actual del modelo, por lo que la inclusión simultánea de diversos parámetros a robustecer implicaría un gran aumento en la dimensionalidad del problema, debiendo recurrir a técnicas alternativas como división y generación de sub-problemas independientes o la relajación de algunas de las restricciones existentes.

Bibliografía

- [1] BEN-TAL, A., EL-GHAOU, L. y NEMIROVSKI A. (2009). Robust Optimization *Princeton University Press*.
- [2] BEN-TAL, A. y NEMIROVSKI, A. (2000). Robust solutions of linear programming problems contaminated with uncertain data. *Math Programming* 88 pp. 411-424.
- [3] BERTIMAS, D. y SIM, M.(2004). The Price of Robustness. *Operations Research* 52(1) pp. 35-53.
- [4] BOHLE, C., MATORANA, S. y VERA, J.. A robust optimization approach to wine grape harvesting scheduling. *European Journal of Operational Research* 200 (2010) pp. 245-252.
- [5] SOYSTER, A. L. (1973). Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. *Operations Research* 21 pp. 1154-1157.
- [6] BIENSTOCK, D. y OZBAY, N.(2008). Computing robust bassetock levels. *Discrete Optimization* 5 pp. 389-414.
- [7] BIRGE, JOHN, R. y LOUVEAUX, F.(1997). *Introduction to Stochastic Programming*. New York: Springer.
- [8] FERRER, J. C, MAC CAWLEY, A., MATORANA, S., TOLOZA, S. y VERA, J. (2008). An optimization approach for scheduling wine grape harvest operation. *Int. J. Production Economics* 112 pp. 985-999.
- [9] MAC CAWLEY, A. (2002). Sistema de Apoyo a la Planificación de Cosecha en Vinos. (Tesis de mastra no publicada). Pontificia Universidad Catolica de Chile, Santiago, Chile.
- [10] TOLOZA, S. (2007). Construcción de un sistema de apoyo a las decisiones de cosecha de uva para vinos, basado en herramientas de optimización. (Tesis de mastra no publicada). Pontificia Universidad Catolica de Chile, Santiago, Chile.

- [11] BOHLE, C. (2008). Planificación Robusta: Aplicación al proceso de cosecha de uva para la industria vitivinícola. (Tesis de mastra no publicada). Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

ANEXO A. CÓDIGO AMPL

A.1. Código modelo

```
##### Conjuntos #####
set cuartel_mec; #Cuartel susceptible de ser cosechado a maquina
set cuartel_man; #Cuartel susceptible de ser cosechado a mano
set cuartel := cuartel_mec union cuartel_man; #Union de cuarteles MA y ME
set tiempo; #Horizonte de tiempo de planificacion
set vina; #Vias disponibles: V1, V2,...Vn
set iteracion; #Iteracion en horizonte rodante
set produccion; #Tipos de produccion MA y ME
set gammas; #Presupuestos de gammas a considerar en el enfoque adversario
set cepas; #Tipos de cepas existentes
set tAlpha; #Tiempo para la creacion de los alpha, 1...140
set tAlphaAdversario; #Tiempo para la variacion de los alpha, 1...78
set cuartelesCF; #Cuarteles con uvas CF
set cuartelesCS; #Cuarteles con uvas CS
set cuartelesCA; #Cuarteles con uvas CA
set cuartelesSY; #Cuarteles con uvas SY
set cuartelesCH; #Cuarteles con uvas CH
set cuartelesSB; #Cuarteles con uvas SB
set cuartelesCalidadBajaTintos; #Cuarteles de calidad varietal de uvas tintos
set cuartelesCalidadMediaTintos; #Cuarteles de calidad reserva de uvas tintos
set cuartelesCalidadAltaTintos; #Cuarteles de calidad premium de uvas tintos
set cuartelesCalidadBajaBlancos; #Cuarteles de calidad varietal de uvas blancos
set cuartelesCalidadMediaBlancos; #Cuarteles de calidad reserva de uvas blancos
set cuartelesCalidadAltaBlancos; #Cuarteles de calidad premium de uvas blancos
set pruebas; #0 caso nominal, 1 tdesfase 0.4 menos

##### Parametros #####
param Factor {cuartel,tiempo}; #Factor penalizacion por cuartel
param Costo_Contra >= 0; #Costo de Contratacion
param Costo_Despido >= 0; #Costo Despido
param Costo_Maq; #Costo Maquinaria
param Costo_MO >= 0; #Costo MO
param Product {cuartel} >= 0; #Productividad de MO por dia
param Est_Cose {produccion, cuartel} >= 0; #Estimacion de Cosecha Manual
```

```

param dda {produccion, cepas} >= 0;
#Demanda por tipo de cepas en general en cosecha manual

param Fact {cuartel, tiempo} >= 0; #Matriz de Factibilidad de realizar labores
param Cap_Vina {vina}; #Capacidad de las Vias para cada forma y tpo Manual
param Prod_Maq {cuartel} >= 0; #Productividad Maquinaria
param Hrs_Dis_Maq {tiempo} >= 0; #Disponibilidad Maquinaria
param M; #Variable auxiliar
param Mini {produccion} >= 0; #Minimo a cosechar por cuartel a mano
param piso >= 0; #Piso de trabajadores

#porcentaje de procesamiento en cada dia de desfase 0, 1, 2
param alpha {iteracion, tAlphaAdversario, vina, tiempo, cuartel} default 0;
param alphaVar {tAlpha, vina, tiempo, cuartel} default 0;

param gamma {vina} default 0;
param alphaProm {tAlpha, vina, tiempo, cuartel} default 0;
param advKGamp {produccion, tiempo, cuartel, vina} default 0;
param iterActual default 0; #para controlar las restricciones de bodega
param tDesfase {cuartel, pruebas} >=0;
param tiempoHorizonte;
param bodegaExt;
param Precio {j in cuartel} >= 0;

##### Variables Modelo #####
#Indica si hay vendimia o no en el cuartel en el periodo t (manual)
var vend {produccion, tiempo, cuartel} binary;

#Indica si hay vendimia o no en el cuartel en el periodo t (manual),
#indicando via de destino
var regv {produccion, tiempo, cuartel, vina} binary;

#Kilos cosechados de cada cuartel j y forma MA destinados a cada via
var KGamp {produccion, tiempo, cuartel, vina} >= 0;

#Trabajadores contratados
var NC {tiempo} integer >=0;

#Trabajadores despedidos

```

```

var ND {tiempo} integer >=0;

#Hrs de Maquinaria a ocupar
var MA {tiempo, cuartel} >= 0;

#Numero de trabajadores asignados contratista
var N {tiempo, cuartel} integer >= 0;

##### Variables Problema Adversario #####
#z para el caso presupuesto a nivel de tiempo t
var z {vina, tAlphaAdversario, tiempo, cuartel};

#Variables auxiliares para manejo de |z|
var alpha_u {vina, tAlphaAdversario, tiempo, cuartel} >=0;
var alpha_v {vina, tAlphaAdversario, tiempo, cuartel} >=0;

##### Modelo #####
maximize dos:
sum{t in tiempo}{
  (sum{j in cuartel}{
    (sum{p in produccion}{
      (sum{v in vina}{KGamp[p,t,j,v]*(1-Factor[j,t])*Precio[j])
      -bodegaExt*KGamp[p,t,j,'EX'])
      -Costo_MO*N[t,j]-MA[t,j]*Costo_Maq)
      -Costo_Contra*NC[t]-Costo_Despido*ND[t]);
}
}

##### Restricciones #####

##### Asignacion de capacidades y volumen #####
#R1.1: La cantidad cosechada no debe exceder a la capacidad de la bodega de destino
subject to capacidad_bodega {t in tiempo, v in vina}:
sum{p in produccion, j in cuartel}KGamp[p,t,j,v]<=Cap_Vina[v];

#R1.2: La cantidad cosechada para cada modo debe ser igual a la cantidad disponible
#en el viedo:
subject to estimado {p in produccion, j in cuartel}:
sum{t in tiempo, v in vina}KGamp[p,t,j,v] <= Est_Cose[p,j];

#R1.3: La cantidad cosechada de cada tipo de cepa debe superar al menos la
#demanda minima exigida:

```

```

subject to dda_CF {p in produccion}:
sum{t in tiempo, v in vina, j in cuartelesCF}KGamp[p,t,j,v] >= dda[p,'Cf'];
subject to dda_CS {p in produccion}:
sum{t in tiempo, v in vina, j in cuartelesCS}KGamp[p,t,j,v] >= dda[p,'Cs'];
subject to dda_CA {p in produccion}:
sum{t in tiempo, v in vina, j in cuartelesCA}KGamp[p,t,j,v] >= dda[p,'Ca'];
subject to dda_SY {p in produccion}:
sum{t in tiempo, v in vina, j in cuartelesSY}KGamp[p,t,j,v] >= dda[p,'Sy'];
subject to dda_CH {p in produccion}:
sum{t in tiempo, v in vina, j in cuartelesCH}KGamp[p,t,j,v] >= dda[p,'Ch'];
subject to dda_SB {p in produccion}:
sum{t in tiempo, v in vina, j in cuartelesSB}KGamp[p,t,j,v] >= dda[p,'Sb'];

#R1.4: La cantidad cosechada por sector no debe exceder la capacidad total de la bodega.
subject to capacidad_vina {p in produccion, t in tiempo, j in cuartel, v in vina}:
KGamp[p,t,j,v]<=regv[p,t,j,v]*Cap_Vina[v];

#R1.5: La cantidad cosechada a mano por sector debe ser al menos el minimo exigido.
subject to minima_cosecha {p in produccion, t in tiempo, j in cuartel_man, v in vina}:
KGamp[p,t,j,v]>=Mini[p]*regv[p,t,j,v];

#R1.6: control de asignacion de vias, solo se envia a viados si se cosecha el cuartel.
subject to control1 {p in produccion, t in tiempo, j in cuartel}:
sum{v in vina}regv[p,t,j,v]<=M*vend[p,t,j];

#R1.7: repeticion del control, ahora se busca evitar que vend sea un vector de 1.
subject to control2 {p in produccion, t in tiempo, j in cuartel}:
vend[p,t,j]<=sum{v in vina}regv[p,t,j,v];

#R1.8: Reviso en todo el horizonte de tiempo si hay algo que cosechar, si es asi me
aseguro que se envie a cosechar al menos 1 vez
subject to control3 {j in cuartel: (Est_Cose['MA',j]+Est_Cose['ME',j])!=0}:
sum{p in produccion, t in tiempo}vend[p,t,j]>=1;

#R1.9: Verifica factibilidad de la fecha de cosecha.
subject to factibilidad {p in produccion, t in tiempo, j in cuartel, v in vina}:
regv[p,t,j,v]<=Fact[j,t];

##### Asignacion de cosecha manual #####

```

```

#R2.1: Controla que la cosecha asignada no exceda la productividad de los trabajadores.
subject to product_man {j in cuartel_man, t in tiempo}:
sum{v in vina} KGamp['MA',t,j,v]<=N[t,j]*Product[j];

#R2.2: Controla la continuidad en la cantidad de mano de obra.
subject to continuidad {t in tiempo: t>=2}:
sum{j in cuartel_man} N[t,j] = sum{j in cuartel_man}N[t-1,j] + NC[t] - ND[t];

#R2.3: Que se asigne por lo menos el minimo de trabajadores a cada sector.
subject to min_trab {t in tiempo, j in cuartel}:
N[t,j]>=piso*vend['MA',t,j];

##### Asignacion de cosecha mecanica #####

#R3.1: Vigila que la cosecha asignada no exceda la capacidad de la maquinaria
subject to product_mec {j in cuartel_mec, t in tiempo}:
sum{v in vina}KGamp['ME',t,j,v]<=MA[t,j]*Prod_Maq[j];

#R3.2: Vigila que no se asigne mas maquinaria de la disponible
subject to maq_disp {t in tiempo}:
sum{j in cuartel} MA[t,j]<=Hrs_Disp_Maq[t];

##### Restricciones de Inventario #####

#R5.1: Vigila que para cada tiempo, la cantidad cosechada hasta esa fecha, menos,
#la cantidad fermentada de esas cosechas hasta ese tiempo,
#no supere la capacidad de la bodega
subject to capBodega_diaria {i in 0..iterActual, v in vina, t in tiempo}:
sum{p in produccion, n in tiempo: n<=t}
(sum{j in cuartel} (KGamp[p,n,j,v] -
sum{k in tiempo: k<=t} (alpha[i,k,v,n,j]*KGamp[p,n,j,v]))) <= Cap_Vina[v];

##### Problema Adversario #####

#ppto para ver por cada t un gamma determinado en el que puede variar lo procesado
del resto de los dias en ese dia t

minimize adversario:
sum{p in produccion, j in cuartel, v in vina, t in tiempo, n in tiempo, k in tiempo: n<=t}

```

```

(alphaVar[k,v,n,j]*advKGamp[p,n,j,v]*z[v,k,t,j]);

#R6.1
subject to ppto {p in produccion, v in vina, t in tiempo, j in cuartel}:
sum{k in tAlphaAdversario} (alpha_u[v,k,t,j] + alpha_v[v,k,t,j]) <= gamma[v];

#R6.2
subject to controlAlpha {p in produccion, v in vina, t in tiempo, j in cuartel}:
sum{k in tAlphaAdversario} (alphaProm[k,v,t,j]+alphaVar[k,v,t,j]*z[v,k,t,j]) = 1;

#R6.3
subject to controlAlpha_0 {p in produccion, k in tAlphaAdversario,
v in vina, t in tiempo, j in cuartel}:
alphaProm[k,v,t,j]+alphaVar[k,v,t,j]*z[v,k,t,j] >= 0;

#R6.4
subject to zeta1{p in produccion, v in vina, t in tiempo, k in tAlphaAdversario,
j in cuartel}: z[v,k,t,j] <= 1;
subject to zeta2{p in produccion, v in vina, t in tiempo, k in tAlphaAdversario,
j in cuartel}: z[v,k,t,j] >= -1;

#R6.5
subject to alphaUV{p in produccion, v in vina, t in tiempo, k in tAlphaAdversario,
j in cuartel}: z[v,k,t,j] = alpha_u[v,k,t,j] - alpha_v[v,k,t,j];

```

A.2. Codigo .run

```

##### Archivos a Utilizar #####
model modeloCosechasV15.mod;
data modeloCosechasV15.dat;

display 'Modelo V15 Var 0.00';
##### Opciones Solver #####
option solver cplexamp;
option show_stats 1;
#option cplex_options 'timelimit=300 mipgap=0.05';
option cplex_options 'mipgap=0.05';

```

```

##### Parametros Utilizados #####
param pruebaActual default 0.0;
#Valores de gamma a utilizar, 0 problema nominal, 1 tdesfase -0.4

param maxIter default 9;
#Cantidad de iteraciones a realizar en modelacion robusta.
#Si es igual a 0 se resuelve el problema nominal
param repeticionEvaluacion default 100;
#Indica la cantidad de escenarios a evaluar el modelo.

param VAR default 0.5;
#Desviacion maxima porcentual desde el valor promedio de los alpha

param alphaTest {tAlphaAdversario, vina, tiempo, cuartel} default 0;
#Valores simulados de los alpha luego de una variacin uniforme de sus valores promedios

param KGamp_Test {gammas, i in 0..maxIter, produccion, tiempo, cuartel, vina} default 0;
#Almacena los resultados de los KGamp de la ultima solucin del problema maestro

param aux1 default 0;
#Parametro auxiliar para el chequeo de la violacion de la restriccion de capacidad

param checkAlpha default 0;
#Parametro auxiliar para revisar que la suma de los alpha para un mismo t en
#todos sus n sea igual a 1

param tiempocpu {gammas, i in 0..maxIter} default 0;
#Parametro que mide el tiempo de AMPL y CPLEX

param valorNuevo default 0;
#Parametro que contiene el valor de la ultima f.o calculada

param valorAnterior default 0;
#Parametro que contiene el valor de la penultima f.o calculada

param condicion default 0;
#Chequea la condicion de si se cumplio el criterio de diferencia entre
#iteraciones en la f.o

param diferenciaCondicion default 0.1;

```

```

#Valor limite en donde se evalua si las soluciones cambian desde
#la ultima iteracion a la nueva iteracion

param cantidad_feasible {gammas, i in 0..maxIter, j in 1..repeticionEvaluacion}
default 0;
#Cantidad de veces que se viola la restriccion de capacidad de las vias tanto
#en MA como en ME

param acumulado_feasible {gammas, i in 0..maxIter, j in 1..repeticionEvaluacion}
default 0;
#Acumulado que indica por cuanto fue que se violo cada restriccion

param costo_infactibilidad {gammas, i in 0..maxIter, j in 1..repeticionEvaluacion}
default 0;
#Costo ocasionado por la infactibilidad de las soluciones

param valorFO {gammas, i in 0..maxIter} default 0;
#Parametro que guarda el resultado de la funcion objetivo para
#cada iteracion del problema maestro

param costoPC {gammas, i in 0..maxIter} default 0;
#Parametro que guarda el resultado de los costos de perdida de calidad para
#cada iteracion del problema maestro

param costoOp {gammas, i in 0..maxIter} default 0;
#Parametro que guarda el resultado de los costos operacionales
#para cada iteracion del problema maestro

param KTotal {gammas, i in 0..maxIter, tiempo} default 0;
#Cantidad total de cosechas acumuladas por da, separar esto por bodega

param beneficio {gammas, it in 0..maxIter, j in 1..repeticionEvaluacion};
#Beneficio calculado como valor funcin objetivo - costos_infactibilidad

param aux_acumulado default 0;
#Parametro auxiliar para contabilizar las cantidades faltantes

param iterFinal {gammas} default 0;
#parametro auxiliar que indica la ultima iteracion realizada

```

```

param Ntest {gammas, iteracion, tiempo} default 0;
#Parametro auxiliar que copia la cantidad de trabajadores en cada modelo

param promBeneficio{gammas, i in 0..maxIter} default 0;
#Parametro auxiliar que indica los beneficios netos en cada modelo

param promCantidad{gammas, i in 0..maxIter} default 0;
#Parametro auxiliar que indica el porcentaje de infactibilidad en cada modelo

param promAcumulado {gammas, i in 0..maxIter} default 0;
#Parametro auxiliar que indica la cantidad faltante

param promCI {gammas, i in 0..maxIter} default 0;
#Parametro auxiliar que indica los costos de infactibilidad de cada modelo

param KTotalEX {gammas, i in 0..maxIter, tiempo} default 0;
#Parametro auxiliar que indica la cantidad cosechada en cada modelo

param capAcumulado {r in 1..4, vina, tiempo} default 0;
#Parametro auxiliar que indica la capacidad utilizada en cada modelo

##### Problema Maestro #####
problem problemaMaestro:
vend, regv, KGamp, NC, ND, MA, N,
dos,
capacidad_bodega,
estimado,
dda_CF,
dda_CS,
dda_CA,
dda_SY,
dda_CH,
dda_SB,
minima_cosecha,
control1,
control2,
control3,
factibilidad,
product_man,
continuidad,

```

```
min_trab,  
product_mec,  
maq_disp,  
capBodega_diaria  
;
```

```
##### Modelo sin fermentacion #####
```

```
problem modeloSinFermentacion:  
vend, regv, KGamp, NC, ND, MA, N,  
dos,  
capacidad_bodega,  
estimado,  
dda_CF,  
dda_CS,  
dda_CA,  
dda_SY,  
dda_CH,  
dda_SB,  
minima_cosecha,  
control1,  
control2,  
control3,  
factibilidad,  
product_man,  
continuidad,  
min_trab,  
product_mec,  
maq_disp  
;
```

```
##### Problema Adversario #####
```

```
problem problemaAdversario:  
z, alpha_u, alpha_v,  
adversario,  
ppto,  
controlAlpha,  
zeta1,  
zeta2,  
controlAlpha_0,  
alphaUV;
```

```

##### Resolucin Problema Maestro #####

let iterActual:=0;
#let condicion:=0;
let valorNuevo:=0;
let valorAnterior:=0;

solve problemaMaestro;

for {g in gammas} {
let tiempocpu[g,0] := _ampl_time + _total_solve_time;
let valorFO[g,0] := dos;
let costoPC[g,0] := sum{t in tiempo}((sum{j in cuartel}
((sum{p in produccion}((sum{v in vina}
(KGamp[p,t,j,v]*(Factor[j,t])*Precio[j])))))));

let costoOp[g,0] := sum{t in tiempo}
((sum{j in cuartel}((sum{p in produccion}
(bodegaExt*KGamp[p,t,j,'EX']))+
Costo_MO*N[t,j]+MA[t,j]*Costo_Maq))+
Costo_Contra*NC[t]+Costo_Despido*ND[t]);

for {t in tiempo} let Ntest[g, iterActual, t]:= sum{j in cuartel}N[t,j];
for {p in produccion, n in tiempo, j in cuartel, v in vina}
  let KGamp_Test[g,0,p,n,j,v]:= KGamp[p,n,j,v];
}

##### Resolucin Problema Adversario #####

for {g in gammas} {
let iterActual:=0;
#let condicion:=0;
let valorNuevo:=valorFO[g,0];
let valorAnterior:=0;

for{p in produccion, t in tiempo, j in cuartel, v in vina} {
let advKGamp[p,t,j,v] := KGamp_Test[g,0,p,t,j,v];
}

display g, maxIter, VAR, 'TL = 300' > feasibleCepas.txt;

```

```

if (g>0) then {
for(v in vina) let gamma[v] := g;
for {i in 1..maxIter} {
if (condicion = 0) then {
if (iterActual > 0) then {
let valorNuevo := dos;

### Traspaso los valores de los KGamp como parametros al problema adversario ###
for{p in produccion, t in tiempo, j in cuartel, v in vina} {
let advKGamp[p,t,j,v] := KGamp[p,t,j,v];
}
}
display 'Comienzo de resolucion problema adversario';
solve problemaAdversario;

let iterActual:= iterActual+1;

### Traspaso los valores como parametros de los alpha caculados
##en el problema adversario
for{k in tiempo, v in vina, t in tiempo, j in cuartel} {
let alpha[iterActual,k,v,t,j] := alphaProm[k,v,t,j]+alphaVar[k,v,t,j]*z[v,k,t,j];
if (alpha[iterActual,k,v,t,j] < 0) then let alpha[iterActual,k,v,t,j] := 0;
}

display 'Comienzo de resolucion problema Maestro';
display i;
solve problemaMaestro;

let tiempocpu[g,iterActual] := _ampl_time + _total_solve_time;
let valorFO[g,iterActual] := dos;

let costoPC[g,iterActual] := sum{t in tiempo}((sum{j in cuartel}
((sum{p in produccion}((sum{v in vina}(KGamp[p,t,j,v]*(Factor[j,t])*Precio[j]))))))));

let costoOp[g,iterActual] := sum{t in tiempo}((sum{j in cuartel}
((sum{p in produccion}(bodegaExt*KGamp[p,t,j,'EX'])))+
Costo_MO*N[t,j]+MA[t,j]*Costo_Maq))+
Costo_Contra*NC[t]+Costo_Despido*ND[t]);

for {p in produccion, n in tiempo, j in cuartel, v in vina}

```

```

let KGamp_Test[g,iterActual,p,n,j,v]:= KGamp[p,n,j,v];
for {t in tiempo} let Ntest[g, iterActual, t]:= sum{j in cuartel}N[t,j];

### Actualizo los valores de las ultima y penultima f.o calculada ###
let valorAnterior := valorNuevo;
let valorNuevo := dos;

### Chequeo si la solucion sigue empeorando o si me mantengo donde mismo ###
if ((valorAnterior - valorNuevo)<diferenciaCondicion) then {
let condicion:=0;
display 'salida por condicion' > feasibleCepas.txt;
}

}
}
}#termina if maxIter>0
let iterFinal[g] := iterActual;
display 'Fin de gamma', g;
}

##### Evaluacion de Solucion #####

display 'Comienzo de evaluacion de resultados';

for {i in 1..repeticionEvaluacion} {

if (i = 10) then display 'REP 10';
if (i = 20) then display 'REP 20';
if (i = 30) then display 'REP 30';
if (i = 40) then display 'REP 40';
if (i = 50) then display 'REP 50';
if (i = 60) then display 'REP 60';
if (i = 70) then display 'REP 70';
if (i = 80) then display 'REP 80';
if (i = 90) then display 'REP 90';
if (i = 100) then display 'REP 100';

for {n in tiempo, v in vina, t in tiempo, j in cuartel} {
let alphaTest[n,v,t,j]:= alphaProm[n,v,t,j]+alphaVar[n,v,t,j]*Uniform(-1.0,1.0);

```

```

}

for {t in tiempo, v in vina, j in cuartel} {
for {n in tiempo} let aux_acumulado:= aux_acumulado + alphaTest[n,v,t,j];

if (aux_acumulado >0) then {
for {n in tiempo} let alphaTest[n,v,t,j]:= alphaTest[n,v,t,j]/aux_acumulado;
}
let aux_acumulado := 0;
}

for {g in gammas, v in vina, t in tiempo: v <> "EX"} {
for {it in 0..iterFinal[g]} {
let aux1:= (sum{p in produccion, n in tiempo: n<=t}
(sum{j in cuartel}(KGamp_Test[g,it,p,n,j,v] - sum{k in tiempo: k<=t}
(alphaTest[k,v,n,j]*KGamp_Test[g,it,p,n,j,v])))) - Cap_Vina[v];

if (aux1 > 1) then {
let cantidad_feasible[g,it,i] := cantidad_feasible[g,it,i] +1;
let acumulado_feasible[g,it,i] := acumulado_feasible[g,it,i]+aux1;
let costo_infactibilidad[g,it,i] := costo_infactibilidad[g,it,i] +
(sum{n in tiempo: n<=t}(
sum{p in produccion, j in cuartel}(
KGamp_Test[g,it,p,n,j,v]
) -
sum{n in tiempo: n<=t-1}(
sum{p in produccion, j in cuartel}(
KGamp_Test[g,it,p,n,j,v]
)
)*bodegaExt;
}
}
}

if (i <=4) then {
for{g in gammas, v in vina, t in tiempo} {
let capAcumulado[i,v,t]:= (sum{p in produccion, n in tiempo: n<=t}(sum{j in cuartel}
(KGamp_Test[g,iterFinal[g],p,n,j,v] -
sum{k in tiempo: k<=t}(alphaTest[k,v,n,j]*KGamp_Test[g,iterFinal[g],p,n,j,v]))));
}
}
}

```

```

}
}

for{g in gammas, it in 0..maxIter, n in tiempo}
let KTotal[g,it,n] := sum{p in produccion, j in cuartel, v in vina}
(KGamp_Test[g,it,p,n,j,v]);

for{g in gammas, it in 0..maxIter, i in 1..repeticionEvaluacion}
let beneficio[g,it,i] := valorFO[g,it]-costo_infactibilidad[g,it,i];

for{g in gammas, i in 0..maxIter, j in 1..repeticionEvaluacion} {
let promBeneficio[g,i]:= promBeneficio[g,i] + (beneficio[g,i,j]/100);
let promCantidad[g,i]:= promCantidad[g,i] + (cantidad_feasible[g,i,j]/100);
let promAcumulado[g,i]:= promAcumulado[g,i] + (acumulado_feasible[g,i,j]/100);
let promCI[g,i]:= promCI[g,i] + (costo_infactibilidad[g,i,j]/100);
}

for{g in gammas, it in 0..maxIter, n in tiempo}
let KTotalEX[g,it,n] := sum{p in produccion, j in cuartel}
(KGamp_Test[g,it,p,n,j,'EX']);
##### Escritura Resultados #####
display pruebaActual > promediosG100PA04.txt;
display promBeneficio, promCantidad, promAcumulado, promCI, valorFO, costoPC, costoOp
> promediosG100PA04.txt;

display KTotal > promediosG100PA04.txt;
display beneficio > feasibleCepas.txt;
display cantidad_feasible > feasibleCepas.txt;
display acumulado_feasible > feasibleCepas.txt;
display valorFO > feasibleCepas.txt;
display costo_infactibilidad > feasibleCepas.txt;
display KGamp > KGamp.txt;
display costoPC > feasibleCepas.txt;
display costoOp> feasibleCepas.txt ;
display tiempocpu > feasibleCepas.txt;
display Ntest > feasibleCepas.txt;
display KTotal > feasibleCepas.txt;

display KTotalEX > promediosG100PA04.txt;
display capAcumulado > promediosG100PA04.txt;

```