

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**

**DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS**

**MODELOS DE PLANIFICACIÓN DE CULTIVOS EN UNA CADENA DE  
SUMINISTRO DE PRODUCTOS ORGÁNICOS**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
INDUSTRIAL**

**DANIELA FRANCISCA NAVARRO CASTRO**

**PROFESOR GUÍA : SR. VICTOR M. ALBORNOZ S.**

**PROFESOR CORREFERENTE : SRA. CAROLINA M. PALACIOS J.**

**SANTIAGO DE CHILE, 02 DE OCTUBRE 2020**

---

# AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis padres que me han acompañado en todo este camino, dándome todas las posibilidades de crecimiento, de desarrollo personal y profesional. Se que en cada paso que doy ellos están y estarán siempre ahí para apoyarme.

A mi hermana Javiera, que siempre que me encontraba con muchas cosas por hacer, me ofrecía un espacio en el sillón para que nos relajáramos viendo una serie y así recargara energías para continuar.

A mis compañeros y amigos, con los que compartí muchas horas en las bancas de la universidad y en la biblioteca haciendo trabajos o sacando la vuelta. Una carrera llena de anécdotas que me siento feliz de compartir con ustedes.

A mi profesor guía quien fue que me dio la oportunidad de realizar este trabajo de memoria y siempre estuvo dispuesto a atender mis consultas y dudas, también de pedirme avances cuando ya necesitaba la presión para terminar este trabajo.

Quisiera agradecer a todas las personas que, de una u otro forma, me han ayudado a lo largo de estos seis años, que han escuchado mis tormentos con los ramos y con quienes he compartido también mis alegrías. Definitivamente mi paso por la universidad no hubiera sido lo mismo sin la compañía de cada uno de ustedes.

---

# RESUMEN EJECUTIVO

En este trabajo de memoria, se considera un sistema de producción de cultivos convencional y un sistema de producción de cultivos orgánicos. Ambos sistemas de producción abordan principalmente dos problemas dentro del contexto de la agricultura de precisión; el primero de ellos corresponde a la delineación de zonas de manejo de un terreno, de tal forma que las zonas seleccionadas tengan una homogeneidad determinada con respecto a una propiedad del suelo que presente variabilidad espacial dentro de dicho terreno, lo que se determinará por medio del concepto de varianza relativa. El segundo problema corresponde a uno de asignación de cultivos, el que consiste en asignar un cultivo a una o varias zonas de manejo con las que se cuente durante el horizonte de planificación, por lo demás, no será necesario determinar un plan de rotación previamente, ya que se trabajará, con la asignación de los cultivos periodo a periodo. En el caso particular del sistema de producción orgánico se considerará además, condiciones que restrinjan y prohíban que cultivos de niveles de extracción de nutrientes elevados y cultivos de una misma familia hortícola, sean sembrados de manera simultánea y consecutiva en zonas adyacentes.

Este trabajo propone resolver un problema de optimización entero-mixto para ambos sistemas de producción de cultivos, por medio de un enfoque integrado que es contrastado con el enfoque jerárquico. A su vez, se resolverá una instancia en particular para estudiar cómo afecta la variación de la cantidad máxima de zonas potenciales que es posible escoger, para la partición del terreno en los costos totales de cultivos.

---

# Índice de Contenidos

<b>1</b>	<b>Introducción</b> .....	<b>8</b>
1.1	Problema de Investigación.....	8
1.2	Objetivos.....	10
1.2.1	Objetivo General.....	10
1.2.2	Objetivos Específicos .....	11
1.3	Organización del Trabajo .....	11
<b>2</b>	<b>Marco teórico</b> .....	<b>13</b>
2.1	Antecedentes.....	13
2.1.1	Superficie Agrícola Orgánica .....	13
2.1.2	Normativa Agricultura Orgánica .....	14
2.1.3	Manejo Orgánico de Cultivos Hortícolas .....	16
2.2	Producción Agrícola.....	18
2.2.1	Problema de Zona de Manejo .....	18
2.2.2	Problema de Rotación de Cultivos.....	21
2.2.3	Rotación de Cultivos Considerando Adyacencia.....	25
2.3	Cadena de Suministro.....	27
2.3.1	Problema de la Cadena de Abastecimiento en la Agricultura .....	28
<b>3</b>	<b>Metodología</b> .....	<b>34</b>
3.1	Modelo de Optimización de Cultivos Orgánicos .....	34
3.1.1	Problema de Zonificación y Rotación de Cultivos .....	35
3.1.2	Problema de Zonificación y Rotación de Cultivos con Restricciones de Adyacencia.....	43
<b>4</b>	<b>Resultados</b> .....	<b>51</b>

---

4.1	Análisis de los Puntos Muestrales .....	52
4.2	Análisis de la Cota Superior .....	59
<b>5</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>62</b>
<b>6</b>	<b>Referencias .....</b>	<b>64</b>
<b>7</b>	<b>Anexos.....</b>	<b>67</b>
	Anexo A .....	67
	Anexo B.....	67
	Anexo C.....	69
	Anexo D .....	71
	Anexo E.....	73

---

# Índice de Tablas

<b>Tabla 2.1.</b> Requerimientos de nitrógeno de algunas especies hortícolas .....	16
<b>Tabla 2.2.</b> Recomendaciones de manejo de nutrición según las necesidades extractivas de cultivos hortícolas.....	17
<b>Tabla 2.3.</b> Relaciones entre distintos tipos de hortalizas.....	17
<b>Tabla 4.1.</b> Resultados del problema de zonificación para cada productor. ....	52
<b>Tabla 4.2.</b> Resultados del problema jerárquico para un sistema de producción de cultivos convencional. ....	54
<b>Tabla 4.3.</b> Resultados del problema integrado para un sistema de producción convencional. ....	55
<b>Tabla 4.4.</b> Comparación entre los enfoques jerárquico e integrado para un sistema de producción de cultivos convencional.....	55
<b>Tabla 4.5.</b> Resultados del problema jerárquico para un sistema de producción de cultivos orgánicos. ....	56
<b>Tabla 4.6.</b> Resultados del problema integrado para un sistema de producción de cultivos orgánicos. ....	57
<b>Tabla 4.7.</b> Comparación entre los enfoques jerárquico e integrado para un sistema de producción de cultivos orgánicos.....	57
<b>Tabla 4.8.</b> Comparación del sistema de producción convencional y producción orgánica en su enfoque jerárquico. ....	58
<b>Tabla 4.9.</b> Resultados del problema integrado para un sistema de producción de cultivos convencional. ....	59
<b>Tabla 4.10.</b> Resultados del problema integrado para un sistema de producción de cultivos orgánicos. ....	60
<b>Tabla 4.11.</b> Comparación del sistema de producción convencional y producción orgánica en su enfoque integrado. ....	61

---

# Índice de Figuras

<b>Figura 2.1.</b> Total de hectáreas de superficie agrícola certificada orgánica en Chile a través de los años .....	13
<b>Figura 2.2.</b> Plan de rotación de cultivos para dos áreas. ....	22
<b>Figura 4.1.</b> Distribución del terreno de cada productor según la instancia en estudio. ....	53
<b>Figura 7.1.</b> Código en AMPL archivo.mod para un modelo de delineación de zonas de manejo.....	67
<b>Figura 7.2.</b> Código en AMPL archivo.mod para un modelo de rotación de cultivos convencionales con enfoque jerárquico.....	67
<b>Figura 7.3.</b> Código en AMPL archivo.mod para un modelo de delineación de zonas de manejo y plan de rotación de cultivos convencionales en su enfoque integrado.	69
<b>Figura 7.4.</b> Código en AMPL archivo.mod para un modelo de rotación de cultivos orgánicos en su enfoque jerárquico. ....	71
<b>Figura 7.5.</b> Código en AMPL archivo.mod para un modelo de delineación de zonas de manejo y plan de rotación de cultivos orgánicos en su enfoque integrado.....	73

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Problema de Investigación

Los suelos son un recurso no renovable, del cual depende el 95% de los suministros de alimentos en el mundo (IFOAM, 2008a), recurso al cual la producción de cultivos convencionales está agotando a un ritmo acelerado, esto debido a que este sistema productivo implica el uso de fertilizantes y pesticidas químicos, que junto a la práctica de monocultivos, reduce la fertilidad de los terrenos. En el último tiempo, se ha observado cómo la agricultura se ha ido ampliando en distintos ámbitos, en donde por un lado se encuentran, los ya mencionados, cultivos convencionales y por otro lado se pueden encontrar los cultivos orgánicos. Si bien ambos tienen características similares, los cultivos orgánicos se diferencian al ser un sistema íntegro de producción silvoagropecuaria basado en prácticas de manejo ecológico, cuyo objetivo principal es alcanzar una productividad sostenida en base a la conservación y/o recuperación de los recursos naturales. Lo anterior se consigue al mejorar la fertilidad de los suelos, considerando en su manejo insumos de materia orgánica como períodos de barbecho, abono verde, el uso de un plan de rotación de cultivos y cultivos intercalados que considera a su vez las familias de cultivos (IFOAM, 2008b). Así mismo, el Servicio Agrícola Ganadero (SAG) delimita a través del Sistema Nacional de Certificación de Productos Orgánicos Agrícolas (SAG, 2010), los requerimientos necesarios para la correcta producción de éstos. Otro sistema productivo existente en la agricultura, son los cultivos agroecológicos, los cuales resultan ser menos estrictos en su manejo, que los cultivos orgánicos, pero tiene la misma práctica de cuidado de la sanidad, fertilidad y sustentabilidad del suelo.

De la misma forma, un problema que está presente en esta línea de cultivos, es la necesidad de la rotación de cultivos, ya que además de mejorar el rendimiento, la calidad y estabilidad de los productos, se asocia a una disminución en los ataques de distintos tipos de plagas, las cuales tal como indica la Ley N°20.089 (SAG, 2010), no pueden eliminarse con los plaguicidas convencionales. El problema de rotación de cultivos fue abordado por Augusto (2018), donde se considera la asignación de cultivos en un horizonte dado de



planificación de múltiples períodos. La asignación es periodo a periodo, con lo cual las rotaciones son resultado de dicha asignación y además se incluyen condiciones que prohíben que cultivos de una misma familia sean plantados simultáneamente en zonas adyacentes.

Por otro lado, se han ido aplicando distintas herramientas de gestión dentro del área de la agricultura, para así poder reducir costos que involucran distintos recursos, tales como hídricos, humanos, energéticos, entre otros. En el contexto de la Agricultura de Precisión, un problema que concita mucho interés, es la definición de zonas homogéneas de manejo agrícola, dada la variabilidad espacial en las propiedades del suelo, aspecto muy importante al momento de determinar la productividad y calidad de las cosechas. Este problema fue afrontado por Cid-García, Albornoz, Ríos-Solís & Ortega (2013), empleando metodologías propias de la Investigación de Operaciones, definiendo zonas de manejo rectangulares, tomando como base o input, información de alguna propiedad física o química del suelo como nutrientes, materia orgánica, humedad y pH, entre otras.

Otro problema presente dentro de la agricultura se puede encontrar en el contexto de la cadena de suministro, en donde se deben considerar distintos factores, como la cantidad de productores con los que se trabajará y considerar la demanda y precios que tendrán los productos. Ante esto, es la diversidad de cultivos la que permite reducir los riesgos, ya que, si una cosecha falla o caen los precios o la demanda del mercado, otros cultivos pueden compensar esta pérdida. Por otro lado, también es necesario tener en consideración otros aspectos relacionados a los productos, como su estacionalidad, su tiempo de maduración, de cosecha y post cosecha, la forma que necesita ser almacenada, entre otros. Lo anterior puede ser formulado matemáticamente para un problema de cadena de suministro, lo cuál fue profundizado por Behzadi, O'Sullivan, Olsen, & Zhang (2018), trabajo que consistió en definir e identificar riesgos, medidas y estrategias que existan actualmente en materia de agricultura y, así mismo, la clasificación de algunos trabajos de modelización enfocados en la cadena de suministros que consideran lo anterior.

Cabe destacar que un problema de cadena de suministro puede integrar también un problema de zonas de manejo y de rotación de cultivos, este trabajo fue abordado por

Albornoz, Véliz, Ortega, & Ortíz-Araya (2020) mediante un modelo lineal de programación estocástica de dos-etapas en variables entera-mixta y también en Albornoz & Urrutia-Gutiérrez (2018), empleando un modelo binivel entero mixto que aborda una cadena de suministro de dos niveles de agro-negocios, donde incluye una estructura de decisión jerárquica, contemplando así al productor agroindustrial en el nivel superior, quien busca maximizar el ingresos, por medio de la delimitación de zonas y asignación de un plan de cultivo a cada zona; y a su vez en el nivel inferior está un mayorista, quien minimiza los costos de demanda insatisfecha, sujeto a las unidades de productos que les provee el nivel superior.

Frente a lo ya descrito, se plantean las interrogantes, ¿De qué forma se puede plantear y resolver un problema de optimización que permita la producción agrícola orgánica?, ¿Qué variables pueden incidir en este tipo de agricultura?, ¿Qué otros elementos se deben tener en cuenta en la planificación de cultivos en una cadena de suministro?

Este trabajo de memoria propone plantear, resolver y comparar un modelo que simultáneamente defina zonas de manejo y un plan de cultivos para dichas zonas periodo a periodo, incorporando restricciones en zonas adyacentes para cultivos de la misma familia botánica y, procurando a la vez en satisfacer una demanda de estos productos orgánicos en la cadena de suministro.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Formular modelos de optimización determinista, mediante herramientas de investigación de operaciones, para abordar un problema de planificación de cultivos en una cadena de suministro en el ámbito de la producción agrícola orgánica, con la finalidad de optimizar la toma de decisiones asociadas.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Definir y plantear las restricciones involucradas, mediante una revisión bibliográfica sobre la programación de siembra, cosecha u otros, de cultivos orgánicos, considerando así mismo la normativa chilena vigente, para su consideración en la formulación del modelo.

Definir los aspectos que se deben de considerar respecto a la naturaleza del problema que se plantea, mediante una revisión bibliográfica en problemas de zonificación, programación de cultivos y de cadena de abastecimiento asociados a su resolución mediante Investigación de Operaciones, para su implementación en la formulación del modelo.

Modelar problemas de zonificación y planificación de cosecha de manera conjunta, mediante un enfoque integrado, como también un enfoque jerárquico, tanto para un sistema de producción convencional como para un sistema de producción de cultivos orgánicos.

Comprobar y comparar la efectividad de los modelos propuestos, mediante su resolución, validación y análisis de la metodología propuesta.

## **1.3 Organización del Trabajo**

Este trabajo de investigación se plantea de la siguiente manera: en primera instancia se presenta el marco teórico, donde se señalan antecedentes sobre la agricultura orgánica, tanto su cobertura a nivel nacional como el rendimiento respecto a su producción; también se presentan algunos artículos sobre la normativa vigente de la agricultura orgánica, que podrían ser relevantes para el presente trabajo; finalmente se va a profundizar respecto al manejo orgánico de cultivos hortícolas.

En el capítulo además se comentan trabajos relevantes sobre problemas de delineación de zonas, plan de cultivos y por último, problemas de cadena de suministro.

Posteriormente, se despliega el capítulo de metodología, en el que se realiza una breve descripción del problema, para luego desarrollar cuatro modelos de optimización deterministas, que comienza por un problema de zonificación y plan de rotación de

cultivos, que se resuelve mediante un enfoque integrado y de igual manera a través de un enfoque jerárquico; luego se continúa por resolver el problema de zonificación y plan de rotación de cultivos, considerando ahora restricciones de adyacencia, el cual se resuelve mediante un enfoque integrado y como también un enfoque jerárquico.

A continuación, se presentan los resultados, estos parten por detallar las características de los experimentos realizados, para luego detallar los resultados de dos análisis. El primer análisis se centra en el tamaño de la superficie a cultivar, lo cual está sujeto a la cantidad total de puntos muestreados con los que se trabajará; el segundo análisis se enfoca en el aumento de la cantidad máxima de zonas de manejos con las que se puede trabajar.

Finalmente, se establecen las conclusiones obtenidas al realizar dicho trabajo de investigación y posibles direcciones futuras que se podrían realizar a partir de esta línea investigativa.

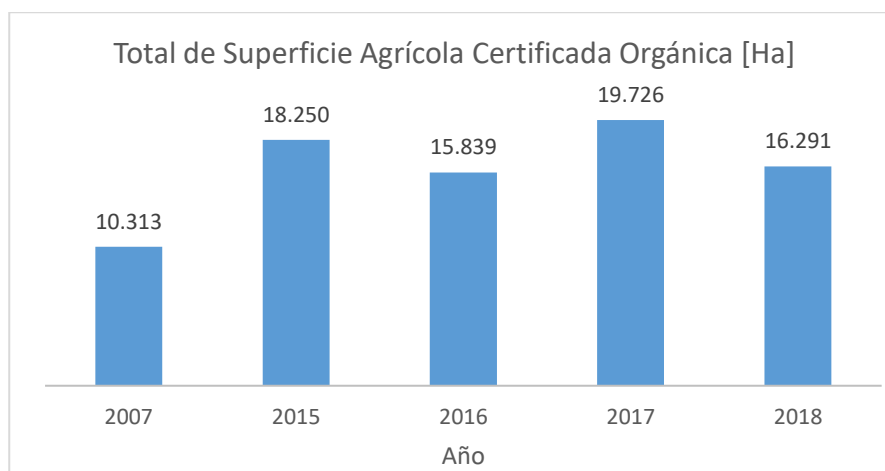
## 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes

#### 2.1.1 Superficie Agrícola Orgánica

Antes de señalar las principales características de la producción orgánica, es importante indicar algunos antecedentes que presentan los cultivos convencionales. En el caso de estos últimos, cerca de un 40% de estos suelos presentan un cierto grado de erosión, reducción de fertilidad o sobrepastoreo. Esta degradación además causa modificaciones en el ciclo bioquímico del carbono, nitrógeno y fósforo (SAG, 2013). No es de extrañar entonces que en Chile la cantidad de hectáreas de superficie orgánica producida ha ido aumentando con el tiempo, donde se aprecia un aumento del 58% desde el año 2007 al 2018, año en el cual se alcanzó un total de 16.291 [ha] (Figura 2.1), esto sin considerar la superficie agrícola certificada orgánica de la recolección silvestre, la cual alcanzó un total de 154.942 [ha] el año 2017. Cabe precisar igualmente que, si bien la superficie de cultivos orgánicos ha ido aumentando, también se observó una disminución del 17% al comparar el año 2017 con el 2018 (ODEPA, 2018; SAG, 2018).

**Figura 2.1.** Total de hectáreas de superficie agrícola certificada orgánica en Chile a través de los años



(Fuente: Elaboración propia).

Entre las propiedades que suele caracterizar un cultivo orgánico es importante considerar el rendimiento que este puede otorgar, ya que al tener que trabajar bajo ciertas restricciones, estos varían en comparación a los cultivos convencionales. En lo que respecta a la agricultura orgánica, su rendimiento es un 25% menor a la agricultura convencional (Seufert, Ramankutty, & Foley, 2012), diferencia que suele atribuirse principalmente al uso de fertilizantes de origen químico sintético en el manejo convencional. Por otro lado esta variación también dependerá del tipo de cultivo con el que se trabaje, en el caso de los cultivos frutales, el rendimiento tendría una diferencia de un 10%, menor para el caso orgánico; en cereales el rendimiento sería del orden de un 25% menor y en el caso de las hortalizas, en la mayoría de los casos los rendimientos son similares entre ambos sistemas de producción, esto se debe a que la producción de hortalizas se miden por unidades/hectáreas (Qualitas Agroconsultores Ltda, 2019). Cabe destacar, que, si bien en un comienzo el rendimiento de la agricultura convencional puede superar a la orgánica, en el largo plazo esta situación puede ir revirtiéndose al ir disminuyendo la fertilidad del suelo en las superficies donde se practica la agricultura convencional.

En la misma línea, es posible disminuir la brecha de rendimiento entre ambos cultivos por medio de 2 alternativas. La primera consiste en el cultivo de diferentes especies en una misma superficie agrícola, lo cual disminuye la brecha a un 8%. La otra alternativa tiene relación a la rotación de cultivos, para lo cual se debe alternar entre distintos cultivos, con necesidades nutritivas diferentes en un mismo lugar durante ciclos distintos, lo cual reduce la diferencia de rendimiento a un 9% (Kremen, 2013).

### **2.1.2 Normativa Agricultura Orgánica**

En lo que respecta a la Ley 20.089, normativa chilena vigente (SAG, 2010), esta tiene por finalidad poder entregar una guía a aquellos productores agrícolas que busquen certificarse como productores orgánicos y sepan que aspectos deben tener en cuenta y que restricciones se deben tener presente al momento de trabajar con este tipo de cultivos.

La ley define a la agricultura orgánica, ecológica o biológica, como un sistema holístico de producción silvoagropecuaria basado en prácticas de manejo ecológico, cuyo objetivo principal es alcanzar una productividad sostenida en base a la conservación y/o

recuperación de los recursos naturales de acuerdo con lo establecido a la Norma Técnica vigente.

En lo que respecta a la producción agrícola orgánica, se deben considerar ciertos aspectos importantes para el caso de estudio, como la imposibilidad de alternar entre producción orgánica y convencional en una superficie transformada, señalado en el Artículo 10, también relacionado a esto, la norma específica que la producción agrícola deberá estar separada de la producción convencional a una distancia de a lo menos 6 metros.

Por otro lado, en lo que respecta al manejo de fertilidad del suelo (Artículo 17), sugiere entre los procesos para mantener la actividad biológica del suelo, implementar un sistema de rotación de cultivos, que permita aumentar la fertilidad del terreno y que a su vez permita el manejo de plagas. En este mismo artículo se destaca que la adición de nitrógeno estará limitada a un máximo de 170 kg/ha/año.

Dentro de la norma, también se destaca el tipo de semillas que es posible utilizar (Artículo 15) y el manejo de plagas (Artículo 18), donde en ambos casos se especifican cuáles pueden ser usados y en el caso de plagas, también se enumeran ciertas sugerencias para poder tratar con éstas.

En otro ámbito, el almacenamiento, envasado, embalaje y comercio, también es mencionado en la norma, donde se especifican ciertos aspectos necesarios al momento de trabajar con productos orgánicos. En la misma línea de los artículos anteriores, se estipula que los productos de origen orgánicos no podrán ser mezclados con aquellos productos convencionales, esto al momento de ser almacenados, envasados y embalados (Artículo 80); más aún, se indica que ambos productos podrán ser almacenados en un mismo lugar, siempre y cuando ambos estén debidamente envasados, identificados y exista una separación adecuada, tal como se señala en el Artículo 83.

### 2.1.3 Manejo Orgánico de Cultivos Hortícolas

Como se mencionó anteriormente, la producción y rendimiento de un cultivo va a variar según sea el tipo, y en el caso de los cultivos hortícolas orgánicos, su rendimiento suele ser similar al sistema de producción convencional. Otro beneficio que presentan las hortalizas y razón por la que su producción cobra mayor importancia, es que permite mantener las malezas bajo control, además de mejorar la calidad del suelo con la continua incorporación de abono orgánico (Vásquez, Céspedes, Paillán, & Vargas, 2012).

Como bien se ha mencionado en diversas ocasiones, una de las prácticas más recomendadas para optimizar la producción de hortalizas, es la rotación de cultivos, intercalando cultivos de diferentes familias botánicas y evitar repetirlos, para así aprovechar los nutrientes disponibles después de cada cultivo en la rotación, incrementando a su vez el suministro de nitrógeno.

Al momento de trabajar en un plan de rotación de cultivos hortícolas, se debe de considerar ciertos puntos tales como: Las necesidades nutricionales de cada especie y sus niveles de extracción (Tabla 2.1); no se debe hacer sucesión entre la misma familia botánica, de igual manera, no es recomendable que se plante en zonas adyacentes, debido a que puede terminar por fatigar el terreno y a su vez provoca que las plagas y enfermedades se hagan cada vez más resistentes; por último, se deben incorporar especies que cumplan su ciclo productivo dentro del tiempo presupuestado de la rotación.

**Tabla 2.1.** Requerimientos de nitrógeno de algunas especies hortícolas

<b>Necesidades Nutricionales</b>		
<b>Alta Extracción (Entre 250 - 180 kg N/ha)</b>	<b>Mediana Extracción (Entre 180 - 120 kg N/ha)</b>	<b>Baja Extracción (Menos de 120 kg N/ha)</b>
Apio	Betarraga	Arveja verde
Brócoli	Espinaca	Cebolla
Coliflor	Lechuga	Poroto verde
Pimiento	Maíz dulce	Rabanito
Papa	Pepino	Zanahoria
Tomate	Zapallo	

(Fuente: Boletín INIA N°232, 2012)



Al momento de determinar cuál es la sucesión óptima de cultivos, como bien se mencionó en el párrafo anterior, es necesario conocer sus necesidades nutricionales y a su vez también es necesario conocer la mejor forma de manejar la nutrición de los suelos según sea la necesidad de cada cultivo.

**Tabla 2.2.** Recomendaciones de manejo de nutrición según las necesidades extractivas de cultivos hortícolas.

Manejo de Nutrición	Necesidades Nutricionales		
	Alta Extracción	Mediana Extracción	Baja Extracción
Abonos verdes	X	X	X
Compost	X	X	X
Biopreparados	X	X	
Suplementos Comerciales	X	X	

(Fuente: Boletín INIA N°232, 2012)

Así mismo, al momento de trabajar con diversos cultivos en un mismo predio, existen asociaciones entre cultivos que pueden ser beneficiosas, como en otros casos desfavorables (**Tabla 2.3**). Entre los beneficios, se puede destacar la acción estimulante que puede tener una especie sobre otra, como también actuar como repelente de plagas o enfermedades (Díaz, 2006). Estos factores son importantes a considerar en un sistema de producción orgánico, ya que el uso de fertilizantes y pesticidas químicos está muy restringido, aunque si bien existen productos permitidos por ley, estas prácticas mencionadas son de gran ayuda.

**Tabla 2.3.** Relaciones entre distintos tipos de hortalizas

Hortaliza	Cultivo precedente	Cultivo siguiente	Buena asociación	Mala asociación	Efecto Asociación
Ajo	Leguminosas		Zanahoria, cebolla, tomate, pepino	Col	Ahuyenta hormigas y roedores
Apio	Leguminosas, espinaca	Mostaza	Espinaca, tomate		Manejo plaga de moscas y efectivo contra sepirosis
Betarraga		Mostaza	Cebolla	Espinaca	s.i
Cebolla	Guisantes, col	Mostaza	Ajo, zanahoria, pepino, tomate		Manejo plaga de moscas, babosas y hormigas
Coliflor	Col, cebolla,	Espinaca	Apio, tomate		s.i

	papa				
Espinaca	Hortalizas en general, excepto betarraga y acelga	Apio, tomate, hortalizas en general	Apio, rábano	Betarraga, acelga	s.i
Lechuga	Rábano	Pepino, col	Betarraga, apio, pepino, espinaca, tomate, rábano	Col, perejil	s.i
Papa			Crucíferas en general	Cebolla, liliáceas	Dorifor
Pepino	Habas, mostaza	Mostaza	Albahaca, apio, espinaca, lechuga, cebolla	Zapallo, rábano	s.i
Pimiento		No repetir hasta 3 años después	Berenjena, zanahoria, tomate, albahaca	Betarraga, guisantes	s.i
Tomate	Espinaca, habas, mostaza	Mostaza	Zanahoria, apio, espinaca, cebolla, perejil, lechuga	Betarraga, guisantes	s.i
Zanahoria			Ajo, cebolla, tomate, rábano	Menta	s.i
Zapallo Italiano	Leguminosas	Mostaza	Albahaca, cebolla	Pepino, papas	s.i

(Fuente: La Fertilidad de la Tierra, núm. 8, Revista de AE.)

## 2.2 Producción Agrícola

Al momento de trabajar con cultivos de distintas especies, es importante considerar otras variables además de las ya mencionadas, entre las cuales se encuentran: las propiedades del suelo, los cultivos con los cuales se trabajará y la demanda asociada a estos cultivos, entre otros. En la literatura existen distintos trabajos que han estudiado y han tomado estas variables para hacerlas parte de sus modelos.

### 2.2.1 Problema de Zona de Manejo

El problema de zonas de manejo apunta a poder delinear zonas específicas de manejo agrícola de manera tal, que la superficie de cada zona sea lo más homogénea posible respecto a las propiedades mismas del suelo. Lo anterior es de suma importancia al elegir cual zona es óptima para un conjunto de planes de cultivo. De igual manera, al ser

uno de los principales objetivos disminuir los costos que conlleva la mantención de cada zona de manejo con su respectivo cultivo, lo ideal es minimizar la cantidad de zonas elegidas, al mismo tiempo que se debe tener en consideración la demanda de los mismos.

El problema de determinar zonas de manejo fue abordado por Cid-garcia et al. (2013) desde la perspectiva de la Investigación de Operaciones, donde se formula un modelo de programación entera binaria, en el cual a partir de la información obtenida sobre una superficie, en relación con las propiedades del suelo, se obtiene una partición en término de zonas de manejo rectangulares. Posteriormente, el problema fue extendido por Albornoz, Véliz, Ortega, & Ortiz-Araya (2020), en el cual además de resolver un problema de zonas de manejo, también se integró un problema de plan de cultivos, donde se considera de igual forma la rotación de cultivos. Este problema se desarrolló a través de dos enfoques, el primero es un enfoque estocástico jerárquico, el cual toma como primer nivel la resolución del problema de delineación de zonas, considerando las propiedades del suelo bajo incertidumbre. En el segundo nivel busca resolver el problema de asignación de planes de cultivos en las zonas previamente definidas. Luego desarrolla el segundo enfoque, en el que integra ambos problemas en uno solo y considera como parámetro bajo incertidumbre las propiedades del terreno.

Un concepto importante que se considera en los trabajos mencionados en esta sección es la varianza relativa, la que permite asegurar cierto nivel de homogeneidad en las potenciales zonas de manejo (Ortega & Santibáñez, 2007), este concepto se define como:

$$RV = 1 - \frac{\sigma_w^2}{\sigma_T^2} \quad (2.1)$$

Donde  $\sigma_T^2$  corresponde a la varianza de la propiedad del suelo considerada para todo el terreno en estudio y  $\sigma_w^2$  es la varianza de una partición determinada del predio, que al considerar una cantidad N de puntos muestrales de la propiedad del suelo y una partición del terreno en Q de zonas de manejo, se puede redefinir como:

$$\sigma_w^2 = \frac{\sum_{i=1}^{i=Q} (n_i - 1) \sigma_i^2}{(N - Q)} \quad (2.2)$$

Que representa a la suma ponderada de las varianzas  $\sigma_i^2$  por cada zona de manejo. Así entonces la ecuación ( 2.1) se puede reescribir de la siguiente forma:

$$RV = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=Q} (n_i - 1) / (N - Q) \sigma_i^2}{\sigma_T^2} \quad (2.3)$$

Donde  $N$  es el número de puntos muestrales de un indicador del suelo dado y  $Q$  es el número de zonas de manejo del terreno;  $\sigma_i^2$  representa la varianza para cada zona  $i$  en la partición y  $\sigma_T^2$  representa la varianza total del terreno respecto a una propiedad del terreno en estudio. Notar que un mayor valor de  $RV$  implica que la partición explica de mejor manera la variación de las propiedades del predio, lo que significa que existen diferencias entre las zonas potenciales, las cuales tienen una alta homogeneidad interna.

Ya habiendo definido el concepto de varianza relativa, se presentará a continuación el modelo desarrollado por Cid-garcia et al. (2013):

### **Conjuntos:**

$I$ : Conjunto que contiene las zonas potenciales.  $i \in I$ .

$J$ : Conjunto que contiene las muestras del suelo.  $j \in J$ .

### **Parámetros:**

$\sigma_i^2$ : Varianza de la zona potencial  $i$ .

$\sigma_T^2$ : Varianza total en el terreno.

$c_{ij}$ : 1 si la zona potencial  $i$  contiene a la muestra  $j$ . 0 en otro caso.

$LS$ : Máxima cantidad de zonas a escoger.

$LI$ : Mínima cantidad de zonas a escoger.

$N$ : Número total de puntos muestreados.

$n_i$ : Cantidad de muestras en la zona potencial  $i$ .

### Variables de Decisión:

$x_i$ : 1 si el cuartel  $i$  es elegido. 0 en otro caso.

### Modelo:

$$\text{Min} \sum_{i \in I} \sigma_i x_i \quad (2.4)$$

### S.a.

$$\sum_{i \in I} c_{ij} x_i = 1, \quad \forall j \in J \quad (2.5)$$

$$\sum_{i \in I} x_i \leq LS \quad (2.6)$$

$$\sum_{i \in I} x_i \geq LI \quad (2.7)$$

$$\left( 1 - \frac{\sum_{i \in I} (n_i - 1) \sigma_i^2 x_i}{\sigma_T^2 [N - \sum_{i \in I} x_i]} \right) \geq \alpha \quad (2.8)$$

$$x_i \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I \quad (2.9)$$

La restricción ( 2.4)( 2.5) garantiza que cada punto muestral esté cubierto por una zona potencial. La restricción ( 2.6) y ( 2.7) corresponden a los límites superior e inferior, respectivamente, para el número de zonas a seleccionar. Finalmente, la restricción ( 2.8) asegura que se cumpla el nivel de homogeneidad requerido para la partición de la superficie. Notar que en un principio esta última no sería lineal, lo cual se soluciona al linealizar la inecuación, obteniendo como resultado:

$$\sum_{i \in I} [(n_i - 1) \sigma_i^2 + (1 - \alpha) \sigma_T^2] x_i \leq (1 - \alpha) \sigma_T^2 N \quad (2.10)$$

## 2.2.2 Problema de Rotación de Cultivos

La rotación de cultivos es una práctica de manejo agrícola, que tiene por fin maximizar la productividad de una superficie, optimizando así el uso de los recursos.

Consiste en la sucesión de diferentes cultivos en el mismo suelo a través del tiempo, considerando los tiempos y características que están sujetos a cada cultivo en particular. En el caso chileno la sucesión es generalmente año a año, siendo común que se obtenga sólo una cosecha al año o temporada agrícola (Silva, Vergara, & Acevedo, 2015). Esta práctica se considera como un sistema que le da sustentabilidad a la producción, ya que al incluir diferentes tipos de cultivos, se logra de manera más efectiva el control de enfermedades y plagas, así mismo existen efectos en la estructura del suelo, relacionado a su composición orgánica y de nutrientes.

Así mismo, un plan de rotación de cultivos es un “calendario” de cultivos que muestra el tiempo de producción de cada cultivo (considerando este periodo de producción desde la fecha de siembra de un cultivo, hasta su cosecha). Por ejemplo, suponiendo que se tienen 5 cultivos A, B, C, D y E, donde los tiempos de producción corresponden a 4, 2, 2, 3 y 1 respectivamente. La Figura 2.2 muestra un cronograma de 6 períodos en dos áreas (es decir, cada rotación tiene una longitud de 6), con 5 cultivos: la rotación de cultivos B-A en el área 1, y la rotación de cultivos E-C-D en el área 2. En el cultivo programación de rotación para el área 1, el cultivo B se planta en el período 3 y se cosecha en 4, y el cultivo A se cultiva durante los períodos 5, 6, 1 y 2 (Dos Santos, Michelon, Arenales, & Santos, 2011).

**Figura 2.2.** Plan de rotación de cultivos para dos áreas.

Periodo	1	2	3	4	5	6
Área 1			B		A	
Área 2			E	C		D

(Fuente: Dos Santos et al., 2011)

Este tipo de problema se puede desarrollar bajo distintos puntos de vista, entre ellos se encuentra el trabajo desarrollado por Capitanescu, Marvuglia, Navarrete Gutiérrez, & Benetto (2017), donde se plantea un problema de rotación de cultivos con múltiples etapas (periodos) en donde además se consideran restricciones relacionadas a la sustentabilidad. En este modelo se plantea como objetivo, la maximización de beneficios sujetos a la

producción de cultivos de cereales y de hortalizas, sujeto a un plan de cultivos predeterminado con anterioridad.

**Conjuntos:**

$T$ : Número de periodos para el horizonte de planificación

$NC$ : Conjunto de tipos de cultivos de cereales

$NL$ : Conjunto de tipos de cultivos de hortalizas

$NI$ : Conjunto de categorías de impacto ambiental consideradas

**Parámetros:**

$bL(l)$  = Beneficio esperado del cultivo de hortalizas  $l$

$bC(c)$ : Beneficio esperado del cultivo de cereal  $c$

$A_{total}$ : Superficie total disponible para cultivar en la granja

$AL(l, 0)$ : Superficie de cultivo de hortalizas  $l$  durante el caso base ( $t=0$ )

$AC(c, 0)$ : Superficie de cultivo de cereal  $c$  durante el caso base ( $t=0$ )

$segL(s, t)$ : Indica si un cultivo es de cereal u hortalizas (toma el valor de 1 para las hortalizas y de 0 para el caso de los cereales) durante el año  $t$  en el esquema de rotación  $s$ , donde el cultivo es de hortalizas en el caso base

$segC(s, t)$ : Indica si un cultivo es de cereal u hortalizas (toma el valor de 1 para las hortalizas y de 0 para el caso de los cereales) durante el año  $t$  en el esquema de rotación  $s$ , donde el cultivo es de cereales en el caso base

$CEI(l, i)$ : Impacto ambiental  $i$  para el cultivo de hortaliza  $l$

$CEI(c, i)$ : Impacto ambiental  $i$  para el cultivo de cereal  $c$

**Variables de Decisión:**

$AL(l, t)$ : Área de cultivo de hortaliza  $l$  durante el año  $t$

$AC(c, t)$ : Área de cultivo de cereal  $c$  durante el año  $t$

$\Delta EI(i, t)$ : Cambio general del impacto ambiental  $i$  durante el año  $t$

$crsL(s)$ : Variable binaria, toma el valor de 1 si el esquema  $s$  está activo cuando el caso base corresponde a cultivos de hortalizas y 0 si está inactivo

$crsC(s)$ : Variable binaria, toma el valor de 1 si el esquema  $s$  está activo cuando el caso base corresponde a cultivos de cereales y 0 si está inactivo

**Modelo:**

$$\text{Max} \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{l=1}^{NL} bL(l)AL(l, t) + \sum_{c=1}^{NC} bC(c)AC(c, t) \right] \quad (2.11)$$

**S.a.**

$$\sum_{l=1}^{NL} AL(l, t) + \sum_{c=1}^{NC} AC(c, t) = A_{total} \quad (2.12)$$

$$\frac{\sum_{s=1}^{NS} [crsL(s)seqL(s, t)AL(s, 0) + crsC(s)seqC(s, t)AC(s, 0)]}{\sum_{l=1}^{NL} AL(l, t)} = 1 \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} \Delta EI(i, t) &= \sum_{l=1}^{NL} [AL(l, t) - AL(l, t - 1)]CEI(l, t) \\ &+ \sum_{c=1}^{NC} [AC(c, t) - AC(c, t - 1)]CEI(c, t) \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\sum_{t=1}^T \Delta EI(i, t) \leq 0 \quad (2.15)$$

$$\sum_{s=1}^{NS} crsL(s) = 1 \quad (2.16)$$

$$\sum_{s=1}^{NS} crsC(s) = 1 \quad (2.17)$$



$$crsL(s), crsC(s) \in \{0,1\}, \quad s = 1, \dots, NS \quad (2.18)$$

$$0 \leq AL(l, t) \leq A_{total}, \quad l = 1, \dots, NL, t = 1, \dots, T \quad (2.19)$$

$$0 \leq AC(c, t) \leq A_{total}, \quad c = 1, \dots, NC, t = 1, \dots, T \quad (2.20)$$

La restricción ( 2.12) asegura que la suma de las superficies de ambos tipos de cultivos, no superen a la superficie total disponible para cultivar. La restricción ( 2.13) por su parte asegura que se cumplan los esquemas de rotación de cultivos de hortalizas durante el año; para el caso de los cereales, se puede inferir implícitamente de la restricción ( 2.12). Las restricciones ( 2.14) y ( 2.15) están asociadas a ámbito ambiental, para así no agravar el impacto que se puede provocar tanto en la superficie orgánica como en el ambiente, lo cual puede considerar a su vez condiciones relacionadas al suelo orgánico y las propiedades que son necesarias de observar. Finalmente, las restricciones ( 2.16) y ( 2.17)( 2.18) aseguran que solo exista un plan de rotación de cultivo para un horizonte de tiempo dado.

### 2.2.3 Rotación de Cultivos Considerando Adyacencia

Otra forma de poder ampliar el problema integrado recién descrito, es considerando al mismo la adyacencia de familias de cultivos, lo cual permite maximizar el uso de los terrenos que son cultivados. La adyacencia, considera que los cultivos de una misma familia botánica no deben cultivarse al mismo tiempo en terrenos adyacentes. Así mismo es importante considerar la sucesión de cultivos, que plantea que los cultivos de una misma familia botánica no pueden plantarse en secuencia en un mismo terreno agrario.

Este problema que considera como restricción las zonas adyacentes, es desarrollado por Dos Santos et al. (2011), donde se propone un modelo con variables binarias, sin considerar rotaciones preestablecidas, siendo el modelo quien determina que cultivo sembrar, en el momento que este debe ser sembrado y en donde, maximizando así el tiempo de ocupación de los terrenos disponibles.

#### Parámetros

M: Número de periodos en cada rotación.

L: Número de cultivos (partes del área total disponible para plantar).

$C$ : Conjunto de cultivos que pueden ser seleccionados para plantar, excepto cultivos de abono verde.

$G$ : Conjunto de cultivos que pueden ser seleccionados para abono verde.

$N$ : Cardinalidad de  $C \cup G$ .

$NF$ : Número de familias botánicas.

$F(p)$ : Conjunto de cultivos de la familia botánica  $p$ ,  $p = 1 \dots NF$ .

$A(k)$ : Lista de parcelas adyacentes a la parcela  $k$ .

$t_i$ : Tiempo de producción del cultivo  $i$  incluyendo el tiempo estimado para preparar el suelo y la cosecha.

$I_i$ : Periodo  $[e_i, b_i]$  durante el cual el cultivo  $i$  puede ser plantado, donde  $e_i$  es el primer periodo en que el cultivo  $i$  puede ser plantado y  $b_i$  es el último.

### Variables de Decisión

$X_{ijk}$ : 1 si el cultivo  $i$  es plantado durante el periodo  $j$  en la parcela  $k$ , 0 en otro caso,  $i = 1 \dots, j \in I_i, k = 1 \dots L$ .

### Modelo

$$(CRS) Z_{CRS} = \max \sum_{k=1}^L \sum_{i \in C} \sum_{j \in I_i} t_i X_{ijk} \quad (2.21)$$

**S.a.**

$$\sum_{i=1}^n \sum_{r=0}^{t_i-1} X_{i(j-r)k} \leq 1, \quad j = 1 \dots M, k = 1 \dots L \quad (2.22)$$

$$\sum_{i \in F(p)} \sum_{r=0}^{t_i} X_{i(j-r)k} \leq 1, \quad p = 1 \dots NF, j = 1 \dots M, k = 1 \dots L \quad (2.23)$$

$$\sum_{j=1}^M \sum_{i \in G} X_{ijk} = 1, \quad k = 1..L \quad (2.24)$$

$$\sum_{j=1}^M X_{njk} = 1, \quad k = 1..L \quad (2.25)$$

$$\sum_{i \in F(p)} \sum_{r=0}^{t_i} X_{i(j-r)u} + X_{i(j-r)v} \leq 1, \quad p = 1..NF, j = 1..M, (u, v) \in A \quad (2.26)$$

$$X_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad i = 1..n, j \in I_i, k = 1..L \quad (2.27)$$

La restricción ( 2.22) del modelo asegura que no se puedan superponer cultivos en una parcela, según los tiempos de cada cultivo, es decir, si se selecciona un cultivo y este ocupa tres periodos, esta restricción prohíbe seleccionar un cultivo para esa parcela en los tres periodos que utilizará. La restricción ( 2.23) asegura que posterior a la cosecha de un cultivo, el próximo a seleccionar no sea uno de la misma familia botánica del cultivo recién cosechado. Las restricciones ( 2.24) y ( 2.25) le indican al modelo que debe existir durante el periodo de planificación un periodo de barbecho y otro de abono verde. Finalmente, la restricción ( 2.26) prohíbe que en dos zonas adyacentes coexistan dos cultivos de una misma familia botánica.

## 2.3 Cadena de Suministro

El objetivo de una cadena de suministro, también conocida como cadena de abastecimiento, es poder relacionar de manera correcta a toda la red integrada a un negocio, es decir, enlaza a proveedores, fábricas, bodegas, almacenes y clientes. Para esto, se requiere información previa, además de administración de artículos, ingresos, entre otros aspectos relevantes. Por otro lado, el principal fin de enfocarse en optimizar una cadena de suministro, es minimizar los costos totales de los componentes que constituyen la cadena, cumpliendo con los requerimientos y restricciones del nivel de servicio de cada eslabón (Nahmias, 2007).

A modo de ejemplo, según N. Nogues, dueño y encargado de Rincón Orgánico<sup>1</sup> (comunicación personal, 06 de mayo, 2019), la cadena de suministro de Rincón Orgánico se compone de 3 distintas etapas, las cuales corresponden a:

- Productores agrícolas
- Centro de acopio (bodega)
- Clientes

Respecto a los productores agrícolas, N. Nogues afirma que trabaja con alrededor de 15 pequeños productores agrícolas certificados orgánicos, los cuales en su mayoría se ubican en la Región de Valparaíso y le proveen semanalmente distintas variedades de productos. Por otro lado, el centro de acopio, lugar que es usado tanto de bodega como lugar de empaque, se encuentra en Curacaví. Por último, es él quien se encarga del transporte de los productos para los clientes, para esto se tienen destinados dos días a la semana. Los días martes se reparte a las comunas de Las Condes, Lo Barnechea y Vitacura, además del sector de Chicureo; los viernes en cambio se reparte a las comunas de La Reina, Ñuñoa, Peñalolén y Providencia. Cabe destacar que la demanda es incierta, ya que si bien Nogues sabe la cantidad que se debe de solicitar de cada producto al estar en contacto directo con los clientes, esto es algo que va variando semana a semana, ya que no todas las semanas tiene la misma cantidad de pedidos ni tampoco le solicitan la misma cantidad de productos.

### **2.3.1 Problema de la Cadena de Abastecimiento en la Agricultura**

En línea a las secciones anteriores, es importante volver a destacar que al trabajar con productos orgánicos, el uso de conservantes o pesticidas está restringido, es por esta razón que considerar la perecibilidad de los productos en la cadena de suministro cobra una mayor importancia, lo cual está enlazado tanto a los planes de cultivos y a la demanda de estos. Este problema es abordado por Nguyen, Goff, & Accorsi (2019), donde se consideran distintas variantes del problema mencionado, considerando el tiempo límite de expiración de los productos, ventana de tiempo para la entrega de productos y considerando inventario de productos.

---

<sup>1</sup> Emprendimiento que a través de la plataforma digital Instagram se encarga de comercializar frutas y verduras certificadas orgánicas en ciertas comunas de la Región Metropolitana.

Por otro lado, los problemas que consideran productos perecederos frecuentemente no suelen incorporar características estocásticas realistas presentes en los diferentes niveles de la cadena de suministro de productos frescos (Ahumada & Villalobos, 2009). Además, no basta con quedarse solo hasta la etapa del inventario, ya que como se mencionó anteriormente, es necesario considerar los distintos factores que también están inmersos en una cadena de suministro, como lo es el punto de packing, centro de distribución y los clientes, estos últimos muchas veces se ven representados por un mayorista, quien adquiere los productos a partir de diversos productores agrícolas. En agricultura los factores mencionados se encuentran sujetos a su vez a variables tales como el clima, el precio, costos de cosecha y transportes, entre otros.

Al trabajar con un sistema de producción orgánico, es importante considerar técnicas asociadas a este sistema, como es el caso de un plan óptimo de rotación de cultivos y que por tanto son de gran importancia a considerar e integrar al problema de abastecimiento que se busque resolver. En un contexto de Cadenas de Suministro jerárquicas, Albornoz & Urrutia-Gutiérrez (2018) formulan un modelo binivel en variables entera-mixta, donde se considera en el nivel superior de la cadena a un productor quien busca maximizar sus ingresos mediante la zonificación del terreno y asignar un plan óptimo de rotación de cultivos a cada zona de manejo; en el nivel inferior de la cadena en cambio, se encuentra un cliente mayorista, quien busca minimizar el costo por ventas perdidas al intentar satisfacer la demanda de productos agrícolas, asumiendo la cantidad producida por el productor como una oferta de cultivos de la cual decide adquirir o no, según sean sus requisitos de demanda. Se detalla a continuación una reformulación del modelo de acuerdo a uno de programación entera-mixta:

### **Parámetros**

$T$  = Periodos de tiempo

$Z$  = Conjunto de potenciales zonas de manejo

$I$  = Conjunto de cultivos

$K$  = Conjunto de planes de rotación de cultivos

$S$  = Conjunto de puntos muestrales

$J$  = Conjunto de clientes mayoristas

$c_{kz}$  = Costo de cultivar el plan de rotación de cultivos  $k$  en la zona de manejo  $z$ .

$r_{it}^{kz}$  = Rendimiento estimado del cultivo  $i$  cosechado en el periodo  $t$ , en el plan de rotación de cultivo  $k$ , en la zona de manejo  $m$ .

$d_{it}^j$  = Demanda del cultivo  $i$  por parte del cliente mayorista  $j$  en el periodo  $t$ .

$a_{sz}$  = Coeficiente que toma el valor 1 si el punto muestral  $s$  pertenece a la zona  $z$  y 0 en caso contrario.

$n_z$  = Número total de puntos muestrales que tiene la zona de manejo  $z$ .

$N$  = Número total de puntos muestrales en el terreno.

$p_{it}$  = Precio del cultivo  $i$  en el periodo  $t$  al cual el mayorista le paga al productor

$pc_i^j$  = Costo de penalización pagado por el cliente mayorista  $j$ , por no satisfacer la demanda del cultivo  $i$ .

$\sigma^2$  = Varianza de las propiedades del terreno en todo el predio.

$\sigma_z^2$  = Varianza de las propiedades del terreno para la zona de manejo  $z$ .

$M$  = Parámetro de la gran  $M$ .

### Variables

$q_{kz}$  = 1 si el plan de rotación de cultivos  $k$  es asignado a la zona de manejo  $z$  y 0 en otro caso.

$x_{it}^j$  = Cantidad de cultivo  $i$  adquirido por el mayorista al productor agroindustrial, para satisfacer la demanda del cliente  $j$  en el periodo  $t$ .

$y_{it}^j$  = Cantidad de ventas perdidas del mayorista del cultivo  $i$ , para el cliente  $j$  en el periodo  $t$ .

$\lambda_{it}^j$  = Multiplicador lagrangeano de la restricción de demanda.

$\nu_{it}^j$  = Multiplicador lagrangeano asociado a la variable  $x$  sobre la restricción de no-negatividad.

$\xi_{it}^j$  = Multiplicador lagrangeano asociado a la variable  $y$  sobre la restricción de no-negatividad.

$\mu_{it}$  = Multiplicador lagrangeano asociado a la oferta de cultivos disponibles de los productores para los mayoristas.

$\pi_{it}$  = Variable de holgura auxiliar.

$\phi_{it}$  = Variable binaria de disyunción que toma un valor 1 si  $\pi_{it} > 0$ , y 0 en otro caso.

$\psi_{it}^j$  = Variable binaria de disyunción que toma un valor 1 si  $x_{it}^j > 0$ , y 0 en otro caso.

$\omega_{it}^j$  = Variable binaria de disyunción que toma un valor 1 si  $y_{it}^j > 0$ , y 0 en otro caso.

### Modelo

$$\max \sum_{\substack{i \in I \\ t \in T}} \left( p_{it} \sum_{j \in J} x_{it}^j \right) - \sum_{\substack{k \in K \\ z \in Z}} c_{kz} q_{kz} \quad (2.28)$$

S.a.

$$\sum_{\substack{k \in K \\ z \in Z}} a_{kz} q_{kz} = 1 \quad , s \in S \quad (2.29)$$

$$\sum_{\substack{k \in K \\ z \in Z}} [(n_z - 1)\sigma_z^2 + (1 - \alpha)\sigma^2] q_{kz} \leq (1 - \alpha) \sigma^2 N \quad (2.30)$$

$$x_{it}^j + y_{it}^j = d_{it}^j \quad , s \in S, j \in J, t \in T \quad (2.31)$$

$$\sum_{j \in J} x_{it}^j + \pi_{kz} = \sum_{\substack{k \in K \\ z \in Z}} r_{it}^{kz} q_{kz} \quad , i \in I, t \in T \quad (2.32)$$

$$-\lambda_{it}^j + \mu_{it} - v_{it}^j = 0 \quad , i \in I, j \in J, t \in T \quad (2.33)$$

$$pc_i^j - \lambda_{it}^j - \xi_{it}^j = 0 \quad , i \in I, j \in J, t \in T \quad (2.34)$$

$$\pi_{it} \leq M\phi_{it} \quad , i \in I, t \in T \quad (2.35)$$

$$\mu_{it} \leq M(1 - \phi_{it}) \quad , i \in I, t \in T \quad (2.36)$$

$$x_{it}^j \leq M\psi_{it}^j \quad , i \in I, t \in T \quad (2.37)$$

$$v_{it}^j \leq M(1 - \psi_{it}^j) \quad , i \in I, t \in T \quad (2.38)$$

$$y_{it}^j \leq M\omega_{it}^j \quad , i \in I, j \in J, t \in T \quad (2.39)$$

$$\xi_{it}^j \leq M(1 - \omega_{it}^j) \quad , i \in I, j \in J, t \in T \quad (2.40)$$

$$x_{it}^j, y_{it}^j, v_{it}^j, \xi_{it}^j \geq 0, \psi_{it}^j, \omega_{it}^j \in \{0,1\} \quad , i \in I, j \in J, t \in T \quad (2.41)$$

$$q_{kz} \in \{0,1\} \quad , k \in K, z \in Z$$

$$\mu_{it} \geq 0, \phi_{it} \in \{0,1\} \quad , i \in I, t \in T$$

La restricción ( 2.29) cumple con dos propósitos, el primero es asegurar que cada punto muestral del predio sea cubierto por solo una potencial zona de manejo, el segundo es garantizar que solo exista un plan de rotación de cultivo por cada zona de manejo. La restricción ( 2.30) garantiza que se consiga el nivel de homogeneidad requerido. La restricción ( 2.31) atiende a la demanda requerida, permitiendo la existencia de ventas perdidas, cabe destacar que al trabajar con productos frescos y perecibles, no se considera un inventario en esta ecuación. La restricción ( 2.32) establece la oferta de cultivos que hay disponible para el mayorista a adquirir. La expresión en las ecuaciones ( 2.33)-( 2.34)



surgen a partir de la reformulación de Karush-Kuhn-Tucker (KKT). La restricción ( 2.35)-(2.40) surgen de la formulación de las restricciones complementarias.

El enfoque más directo para reformular un problema de dos niveles como a un problema de un solo nivel, es utilizar las condiciones de optimización del problema lineal superior, tal como se hizo en el trabajo señalado. Para mantener las condiciones de linealidad del problema, se utiliza las condiciones de KKT.

## 3 METODOLOGÍA

Lo que se busca lograr en este trabajo, es poder realizar la partición del terreno de distintos productores agrícolas, en zonas de manejo rectangulares, considerando las propiedades del suelo, tamaño del terreno y por lo tanto su rendimiento, variabilidad temporal y considerando además una demanda asociada que se busca cumplir al integrar a problema la cadena de suministro. A su vez, al modelo se le asignan cultivos en cada periodo, considerando el nivel de extracción de nutrientes de cada cultivo y respetando las condiciones de adyacencia, donde el resultado esperado es minimizar costos asociados a la producción de cada cultivo.

La metodología que se presentará a continuación corresponde a tres etapas, en primer lugar, se busca modelar y resolver un problema integrado de zonificación y rotación de cultivos, para posteriormente junto a la resolución directa del problema lineal entero mixto, se estudiará y comparará con la resolución del mismo mediante un enfoque jerárquico.

En segundo lugar, se busca modelar y resolver un problema integrado de zonificación y rotación de cultivos considerando restricciones de adyacencia. De igual forma, junto a la resolución directa del problema lineal entero mixto, se va a estudiar y a comparar con la resolución del mismo, mediante un enfoque jerárquico.

Finalmente, la última etapa consiste en la resolución directa del modelo mediante el software AMPL y el Solver CPLEX.

### 3.1 Modelo de Optimización de Cultivos Orgánicos

En esta etapa, se presenta el desarrollo del problema a resolver, el cual considera a un conjunto de productores de cultivos orgánicos, quienes cuentan cada uno con un terreno de distintas características en sus propiedades y superficies. A su vez, cada productor considera una lista de productos con los cuales prefiere trabajar, ya sea por el conocimiento que posee en la producción del cultivo o por otras razones; dichos cultivos cuentan con un

tiempo de producción y también cuenta con una ventana de producción que depende de la temporada a la que pertenezca, características que varían entre cada cultivo.

Así mismo, el terreno de cada productor fue dividido en celdas, las cuales contienen cada una un punto muestreado del terreno, donde cada uno de estos puntos contiene información de interés a partir de datos tomados del trabajo desarrollado por Augusto (2018). Cada celda o un conjunto de estas componen una zona de manejo, las cuales se definen de manera rectangular, estas pueden variar en número o características según el terreno de cada productor.

Por otro lado, se cuenta con un conjunto de bodegas, que funcionan como centro de distribución para llevar los productos a cada cliente posteriormente. A cada bodega le llegan pedidos de cantidades y productos distintos de manera semanal, pero al ser productos estacionales, también lo es la demanda de cada cultivo y estas son conocidas con anterioridad. Además, el modelo considera los viajes que deben realizarse entre los nodos existentes, en donde se considera un camión que posee una capacidad limitada, el cual de ser necesario, puede realizar más de un viaje entre los nodos. Se considera en el costo de viaje el rendimiento que tiene el camión y la distancia que existe entre los productores con cada centro de distribución.

### **3.1.1 Problema de Zonificación y Rotación de Cultivos**

#### **3.1.1.1 Problema Integrado de Zonificación y Rotación de Cultivos**

El modelo que se propone a continuación corresponde a una primera formulación que considera un enfoque integrado para obtener las zonas de manejo óptimas, junto a un plan de rotación de cultivos.

#### **Conjuntos**

$T =$  Periodos,  $t \in T$  [semanas]

$P =$  Productores,  $p \in P$

$C =$  Cultivos,  $i \in C$

$M(p)$  = Zonas potenciales pertenecientes al terreno del productor  $p$ ,  $m \in M(p)$

$N(p)$  = Puntos de muestra pertenecientes al terreno del productor  $p$ ,  $n \in N(p)$

$D$  = Centro de distribución,  $d \in D$

$link$  = Arcos entre los nodos,  $(p, d) \in link$

### Parámetros

$a_{p,n,m}$  = Coeficiente binario que toma el valor de 1 si en el terreno del productor  $p$ , la zona potencial  $m$  cubre al punto de muestral  $n$  y 0 si no.

$CP_{p,i,t}$  = Coeficiente binario que toma el valor de 1 si el productor  $p$  trabaja con el cultivo  $i$  durante el periodo  $t$ , y 0 si no.

$TC_i$  = Tiempo en que demora el cultivo  $i$ , desde que se planta, hasta el momento en que se cosecha [semanas].

$d_{i,t,d}$  = Demanda del cultivo  $i$  en el centro de distribución  $d$  en el periodo  $t$  [Kg].

$Capacidad$  = Capacidad del camión de transporte [Kg].

$costoc_i$  = Costo de mantener el cultivo  $i$ , desde que se planta hasta el momento de su cosecha [\$].

$costom_{(p,d)}$  = Costo de transportar los cultivos desde la ubicación del productor  $p$  al centro de distribución  $d$  [\$].

$costond_i$  = Costo de penalización por demanda no satisfecha del cultivo  $i$  [\$].

$rend_{p,i,m}$  = Rendimiento del terreno del productor  $p$  para el cultivo  $i$  la zona de manejo  $m$  [Kg].

$\sigma_{zona_{p,m}}$  = Varianza de la zona potencial  $m$  en el terreno del productor  $p$ .

$\sigma_{tot_p}$  = Varianza total del terreno del productor.

$e_{p,m}$  = Cantidad de puntos muestrales que tiene la zona potencial  $m$  en el terreno del productor  $p$ .

$\alpha$  = Nivel de homogeneidad que es requerido.

$Cota_p$  = Máxima cantidad de zonas potenciales en el terreno del productor  $p$  que se permite escoger.

$Nn_p$  = Cantidad total de puntos muestrales en el terreno del productor  $p$ .

$Tt$  = Periodos de tiempo dentro del horizonte a evaluar en el modelo.

$ne\_alto_i$  = Coeficiente binario que toma el valor 1 si el cultivo  $i$  tiene un alto nivel de extracción de nutrientes y 0 si no.

$ne\_medio_i$  = Coeficiente binario que toma el valor 1 si el cultivo  $i$  tiene un nivel de extracción de nutrientes medio y 0 si no.

### **Variable de Decisión**

$X_{p,i,t,m}$  = Variable binaria que toma el valor de 1 si el productor  $p$  planta el cultivo  $i$  en el periodo  $t$  en zona potencial  $m$  y 0 si no.

$CT_{p,t,d}$  = Números de viajes en el periodo  $t$  desde el productor  $p$  al centro de distribución  $d$ .

$W_{i,t,d}$  = Cantidad de demanda no satisfecha del cultivo  $i$  en el centro de distribución  $d$  en el periodo  $t$ .

$L_{p,i,t,m}$  = Variable binaria que toma el valor 1 si el cultivo  $i$  se encuentra plantado en la zona de manejo  $m$  en el periodo  $t$  en el terreno del productor  $p$  y 0 si no.

$Y_{p,i,t,m}$  = Variable auxiliar que representa el total de kilogramos cosechados en el periodo  $t$  por el productor  $p$  de cultivo  $i$  en la zona potencial  $m$ .

$V_{p,i,t,d}$  = Variable auxiliar que representa el total de kilogramos de cultivo  $i$  transportada desde la localidad del productor  $p$  al centro de distribución  $d$  en el periodo  $t$ .

$Z_{i,t,d}$  = Variable auxiliar que representa el total de kilogramos de cultivo  $i$  en el periodo  $t$  que existe en el centro de distribución  $d$ .

El modelo propuesto corresponde a:

$$\begin{aligned} \text{Min} \sum_{t \in T} \left[ \sum_{p \in P} \sum_{m \in M(p)} \sum_{i \in C} (\text{costoc}_i \cdot e_{p,m} \cdot X_{p,i,t,m}) \right. \\ \left. + \sum_{(p,d) \in \text{link}} (\text{costom}_{(p,d)} \cdot CT_{p,t,d}) + \sum_{d \in D} \sum_{i \in C} \text{costond}_i \cdot W_{i,t,d} \right] \end{aligned} \quad (3.1)$$

**S.a.**

$$Y_{p,i,t,m} = X_{p,i,t,m} \cdot \text{rend}_{p,i,m} \quad ; \forall p \in P, i \in C, t \in T, m \in M(p) \quad (3.2)$$

$$X_{p,i,t,m} \leq CP_{p,i,t} \quad ; \forall p \in P, i \in C, t \in T, m \in M(p) \quad (3.3)$$

$$\sum_{m \in M(p)} Y_{p,i,t} \geq \sum_{d \in D} V_{p,i,t,d} \quad ; \forall i \in C, t \in T, d \in D \quad (3.4)$$

$$\sum_{p \in P} V_{p,i,t,d} = Z_{i,t,d} \quad ; \forall i \in C, t \in T, d \in D \quad (3.5)$$

$$Z_{i,t,d} = d_{i,t,d} - W_{i,t,d} \quad ; \forall i \in C, t \in T, d \in D \quad (3.6)$$

$$V_{p,i,t,d} \leq \text{Capacidad} \cdot CT_{p,t,d} \quad ; \forall p \in P, i \in C, t \in T, d \in D \quad (3.7)$$

$$\sum_{m \in M(p)} \sum_{i \in C} \sum_{k=0}^{TC_i-1} a_{p,n,m} \cdot X_{p,i,(t-k),m} = 1 \quad ; t-k \geq 0 \quad ; \forall p \in P, t \in T, n \in N(p) \quad (3.8)$$

$$\sum_{k=0}^{TC_i-1} X_{p,i,(t-k),m} = L_{p,i,t,m} \quad ; t-k \geq 0 \quad ; \forall p \in P, i \in C, t \in T, n \in M(p) \quad (3.9)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{i \in C} ne\_alto_i \cdot L_{p,i,t,m} \leq 3 \quad ; \forall p \in P, m \in M(p) \quad (3.10)$$

$$\sum_{t \in T} \left( \sum_{i \in C} ne\_medio_i \cdot L_{p,i,t,m} + \sum_{i \in C} ne\_alto_i \cdot L_{p,i,t,m} \right) \leq 4 \quad ; \forall p \in P, m \in M(p) \quad (3.11)$$

$$\sum_{i \in C} \sum_{t=2}^T X_{p,i,t,m} \leq (T-1) \cdot \sum_{i \in C} X_{p,i,1,m} \quad ; \forall p \in P, m \in M \quad (3.12)$$

$$\sum_{m \in M(p)} \sum_{i \in C} [(e_{p,m} - 1) \cdot \sigma\_zona_{p,m,n} + (1 - \alpha) \cdot \sigma\_tot_p] \cdot X_{p,i,t,m} \leq (1 - \alpha) \cdot \sigma\_tot_p \cdot Nn_p \quad ; \forall p \in P, t \in T, n \in N(p) \quad (3.13)$$

$$\sum_{m \in M(p)} \sum_{i \in C} X_{p,i,t,m} \leq Cota_p \quad ; \forall p \in P, t \in T \quad (3.14)$$

$$X_{p,i,t,m}, L_{p,i,t,m} \in \{0,1\}, Y_{p,i,t,m} \geq 0 \quad ; \forall p \in P, i \in C, t \in T, m \in M(p) \quad (3.15)$$

$$W_{i,t,d}, Z_{i,t,d} \geq 0 \quad ; \forall i \in C, t \in T$$

$$V_{p,i,t,d} \geq 0 \quad ; \forall p \in P, i \in C, t \in T, d \in D$$

$$CT_{p,t,d} \geq 0 \quad ; \forall p \in P, i \in C, t \in T, d \in D$$

La función objetivo ( 3.1) del modelo, busca minimizar el costo operacional de las cosechas de los distintos productores dentro del horizonte de planificación. La restricción ( 3.2) cumple con el rol de determinar el rendimiento que es posible obtener en cada zona. La restricción ( 3.3) limita la decisión de producir un cultivo, dependiendo de si este es un producto con el que trabaja el productor y, por otro lado, si se encuentra en temporada de producción. La ecuación ( 3.4) permite contabilizar la cantidad total de cultivo que se produce en un periodo y que es enviado a los centros de distribución. La ecuación ( 3.5) establece que la cantidad de unidades totales de cultivo que llegan a los centros de

distribución va a ser la misma que la suma de los productos desde los distintos orígenes. La restricción ( 3.6) establece que el número de cultivos en los centros de distribución debe al menos cubrir la demanda establecida. La restricción ( 3.7) se asegura que la cantidad cosechada no pueda exceder la capacidad de traslado. La restricción ( 3.8) establece que solo puede existir un único cultivo y que no se encuentren presentes dos o más cultivos de manera simultánea en una zona de manejo específica durante su periodo de producción. La restricción ( 3.10) asegura que no se planten cultivos con un nivel alto de extracción de nutrientes en periodos consecutivos, en ventanas de tiempo de cuatro periodos, mientras que la restricción ( 3.11) garantiza que a lo largo del horizonte de planificación, se cuente con algún abono verde o un periodo de barbecho. La restricción ( 3.12) se asegura que se mantenga la partición establecida en un comienzo de las zonas de manejo, durante todo el horizonte de tiempo. La restricción ( 3.13) asegura que se cumpla con cierto nivel de homogeneidad en las zonas escogidas. Por último, la restricción ( 3.14) limita la máxima cantidad de zonas que puede escoger cada productor.

Por otro lado, junto a la resolución del modelo integrado ya expuesto, se procederá de la misma forma a plantear y resolver el problema por medio de un enfoque jerárquico, donde primero se obtiene la partición del terreno compuesto por un conjunto de zonas de manejo. En segundo lugar, se propone resolver un problema de rotación de cultivos para la partición óptima del terreno obtenida en el primer nivel, resolviendo un problema lineal entero mixto.

### 3.1.1.2 Enfoque Jerárquico de Zonificación y Rotación de Cultivos

#### Problema de Zonificación

Se introduce un modelo de programación entero binario, con el objetivo de conseguir la partición óptima de un terreno en zonas de manejo rectangulares.

#### Variable de Decisión

$Zona_{p,m} = 1$  si la potencial zona  $m$  está dentro de la partición del terreno del productor  $p$  y  $0$  si no.



El modelo propuesto corresponde a:

$$\mathbf{Min} \sum_{m \in M} Zona_{p,m} \quad ; \forall p \in P \quad (3.16)$$

**S.a.**

$$\sum_{m \in M(p)} a_{p,n,m} \cdot Zona_{p,m} = 1 \quad ; \forall p \in P, n \in N(p) \quad (3.17)$$

$$1 - \frac{\sum_{m \in M(p)} (e_{p,m} - 1) \cdot \sigma_{Zona_{p,m}} \cdot Zona_{p,m}}{\sigma_{tot_p} \cdot (Nn_p - \sum_{m \in M(p)} Zona_{p,m})} \geq \alpha \quad ; \forall p \in P \quad (3.18)$$

$$Zona_{p,m} \in \{0,1\} \quad ; \forall p \in P, m \in M(p) \quad (3.19)$$

La función objetivo ( 3.16) busca minimizar el total de zonas de manejo en la partición para cada uno de los productores. La restricción ( 3.17) asegura la obtención de una partición del terreno. Finalmente, la restricción ( 3.18) cumple el mismo objetivo que la restricción ( 3.13), sobre el cumplimiento del nivel de homogeneidad en las zonas escogidas( 3.10).

### **Problema de Rotación de Cultivos**

Posterior a la resolución del problema de zonificación, el segundo nivel propone ahora encontrar el plan de rotación de cultivos óptimo, sujeto una partición predeterminada de un terreno, que se obtuvo por medio de la resolución del modelo ( 3.16) - ( 3.19).

### **Conjunto**

$M(p)^* =$  Zonas potenciales pertenecientes al terreno del productor p,  $m \in M(p)$

Empleando la misma notación de parámetros y decisiones introducidas en la descripción del modelo (3.1) -(3.15), el modelo jerárquico de rotación de cultivos corresponde a:

$$\begin{aligned} \text{Min} \sum_{t \in T} \left[ \sum_{p \in P} \sum_{m \in M(p)} \sum_{i \in C} (\text{costoc}_i \cdot e_{p,m} \cdot X_{p,i,t,m}) \right. \\ \left. + \sum_{(p,d) \in \text{link}} (\text{costom}_{(p,d)} \cdot CT_{p,t,d}) + \sum_{d \in D} \sum_{i \in C} \text{costond}_i \cdot W_{i,t,d} \right] \end{aligned} \quad (3.20)$$

**S.a.**

$$Y_{p,i,t,m} = X_{p,i,t,m} \cdot \text{rend}_{p,i,m} \quad ; \forall p \in P, i \in C, t \in T, m \in M(p)^* \quad (3.21)$$

$$X_{p,i,t,m} \leq CP_{p,i,t} \quad ; \forall p \in P, i \in C, t \in T, m \in M(p)^* \quad (3.20)$$

$$\sum_{m \in M(p)^*} Y_{p,i,t} \geq \sum_{d \in D} V_{p,i,t,d} \quad ; \forall i \in C, t \in T, d \in D \quad (3.22)$$

$$\sum_{p \in P} V_{p,i,t,d} = Z_{i,t,d} \quad ; \forall i \in C, t \in T, d \in D \quad (3.23)$$

$$Z_{i,t,d} = d_{i,t,d} - W_{i,t,d} \quad ; \forall i \in C, t \in T, d \in D \quad (3.24)$$

$$V_{p,i,t,d} \leq \text{Capacidad} \cdot CT_{p,t,d} \quad ; \forall p \in P, i \in C, t \in T, d \in D \quad (3.25)$$

$$\sum_{m \in M(p)^*} \sum_{i \in C} \sum_{k=0}^{TC_i-1} X_{p,i,(t-k),m} = 1 \quad ; t-k \geq 0 \quad ; \forall p \in P, t \in T \quad (3.26)$$

$$\sum_{k=0}^{TC_i-1} X_{p,i,(t-k),m} = L_{p,i,t,m} \quad ; t-k \geq 0 \quad ; \forall p \in P, i \in C, t \in T, n \in M(p) \quad (3.27)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{i \in C} ne\_alto_i \cdot L_{p,i,t,m} \leq 3 \quad ; \forall p \in P, m \in M(p) \quad (3.28)$$

$$\sum_{t \in T} \left( \sum_{i \in C} ne\_medio_i \cdot L_{p,i,t,m} + \sum_{i \in C} ne\_alto_i \cdot L_{p,i,t,m} \right) \leq 4 \quad ; \forall p \in P, m \in M(p) \quad (3.29)$$

$$X_{p,i,t,m}, L_{p,i,t,m} \in \{0,1\}, Y_{p,i,t,m} \geq 0 \quad ; \forall p \in P, i \in C, t \in T, m \in M(p) \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned}
 W_{i,t,d}, Z_{i,t,d} &\geq 0 \quad ; \forall i \in C, t \in T \\
 V_{p,i,t,d} &\geq 0 \quad ; \forall p \in P, i \in C, t \in T, d \in D \\
 CT_{p,t,d} &\geq 0 \quad ; \forall p \in P, i \in C, t \in T, d \in D
 \end{aligned}$$

La función objetivo ( 3.20) tiene como finalidad, minimizar el costo operacional de la producción de cultivos al igual que el modelo ( 3.1)-( 3.15), de igual forma, se puede apreciar que las restricciones planteadas cumplen los mismos objetivos que las restricciones ( 3.2)-( 3.11), con la diferencia de que ahora el conjunto de zonas de manejo corresponde a aquellas zonas seleccionadas en el primer nivel del enfoque jerárquico.

### 3.1.2 Problema de Zonificación y Rotación de Cultivos con Restricciones de Adyacencia

#### 3.1.2.1 Problema Integrado de Zonificación y Rotación de Cultivos con Restricciones de Adyacencia

El modelo que se discute a continuación corresponde a la formulación de un problema lineal entero mixto, donde se considera un enfoque integrado para obtener las zonas de manejo óptimas, junto a un plan de rotación de cultivos donde además se tomarán en consideración restricciones de adyacencia.

#### Conjuntos

$T$  = Periodos,  $t \in T$  [semanas]

$P$  = Productores,  $p \in P$

$C$  = Cultivos,  $i \in C$

$M(p)$  = Zonas potenciales pertenecientes al terreno del productor  $p$ ,  $m \in M(p)$

$N(p)$  = Puntos muéstrales pertenecientes al terreno del productor  $p$ ,  $n \in N(p)$

$D$  = Centro de distribución,  $d \in D$

$links$  = Arcos entre los nodos,  $(u, v) \in links$

$FC =$  Familia de cultivos,  $j \in FC$

$F(j) =$  Cultivos pertenecientes a la familia  $j$ ,  $j = 1 \dots, FC$

$Ady_{p,(m,m')} =$  Pares de zonas adyacentes entre el terreno del productor  $p$ .

**Parámetros:**

$a_{p,n,m} =$  Coeficiente binario que toma el valor de 1 si en el terreno del productor  $p$ , la zona potencial  $m$  cubre al punto de muestral  $n$  y 0 si no.

$CP_{p,i,t} =$  Coeficiente binario que toma el valor de 1 si el productor  $p$  trabaja con el cultivo  $i$  durante el periodo  $t$ , y 0 si no.

$TC_i =$  Tiempo en que demora el cultivo  $i$ , desde que se planta, hasta el momento en que se cosecha [semanas].

$d_{i,t,d} =$  Demanda del cultivo  $i$  en el centro de distribución  $d$  en el periodo  $t$  [Kg].

$Capacidad =$  Capacidad del camión de transporte [Kg].

$costoc_i =$  Costo de mantener el cultivo  $i$ , desde que se planta hasta el momento de su cosecha [\$].

$costom_{(p,d)} =$  Costo de transportar los cultivos desde la ubicación del productor  $p$  al centro de distribución  $d$  [\$].

$costond_i =$  Costo de penalización por demanda no satisfecha del cultivo  $i$  [\$].

$rend_{p,i,m} =$  Rendimiento del terreno del productor  $p$  para el cultivo  $i$  la zona de manejo  $m$  [Kg].

$\sigma_{zona_{p,m}} =$  Varianza de la zona potencial  $m$  en el terreno del productor  $p$ .

$\sigma_{tot_p} =$  Varianza total del terreno del productor.

$e_{p,m}$  = Cantidad de puntos muestrales que tiene la zona potencial  $m$  en el terreno del productor  $p$ .

$\alpha$  = Nivel de homogeneidad que es requerido.

$Cota_p$  = Máxima cantidad de zonas potenciales en el terreno del productor  $p$  que se permite escoger.

$Nn_p$  = Cantidad total de puntos muestrales en el terreno del productor  $p$ .

$Tt$  = Periodos de tiempo dentro del horizonte a evaluar en el modelo.

$ne\_alto_i$  = Coeficiente binario que toma el valor 1 si el cultivo  $i$  tiene un alto nivel de extracción de nutrientes y 0 si no.

$ne\_medio_i$  = Coeficiente binario que toma el valor 1 si el cultivo  $i$  tiene un nivel de extracción de nutrientes medio y 0 si no.

### **Variables de Decisión**

$X_{p,i,t,m}$  = Variable binaria que toma el valor de 1 si el productor  $p$  planta el cultivo  $i$  en el periodo  $t$  en zona potencial  $m$  y 0 si no.

$CT_{p,t,d}$  = Números de viajes en el periodo  $t$  desde el productor  $p$  al centro de distribución  $d$ .

$W_{i,t,d}$  = Cantidad de demanda no satisfecha del cultivo  $i$  en el centro de distribución  $d$  en el periodo  $t$ .

$L_{p,i,t,m}$  = Variable binaria que toma el valor 1 si el cultivo  $i$  se encuentra plantado en la zona de manejo  $m$  en el periodo  $t$  en el terreno del productor  $p$  y 0 si no.

$Y_{p,i,t,m}$  = Variable auxiliar que representa el total de kilogramos cosechados en el periodo  $t$  por el productor  $p$  de cultivo  $i$  en la zona potencial  $m$ .

$V_{p,i,t,d}$  = Variable auxiliar que representa el total de kilogramos de cultivo  $i$  transportada desde la localidad del productor  $p$  al centro de distribución  $d$  en el periodo  $t$ .

$Z_{i,t,d}$  = Variable auxiliar que representa el total de kilogramos de cultivo  $i$  en el periodo  $t$  que existe en el centro de distribución  $d$ .

El modelo propuesto corresponde a:

$$\begin{aligned} \text{Min} \sum_{t \in T} \left[ \sum_{p \in P} \sum_{m \in M(p)} \sum_{i \in C} (\text{costoc}_i \cdot e_{p,m} \cdot X_{p,i,t,m}) + \sum_{(p,d) \in \text{link}} (\text{costom}_{(p,d)} \cdot CT_{p,t,d}) \right. \\ \left. + \sum_{d \in D} \sum_{i \in C} \text{costond}_i \cdot W_{i,t,d} \right] \end{aligned} \quad (3.31)$$

**S.a.**

$$Y_{p,i,t,m} = X_{p,i,t,m} \cdot \text{rend}_{p,i,m} \quad ; \forall p \in P, i \in C, t \in T, m \in M(p) \quad (3.32)$$

$$X_{p,i,t,m} \leq CP_{p,i,t} \quad ; \forall p \in P, i \in C, t \in T, m \in M(p) \quad (3.33)$$

$$\sum_{m \in M(p)} Y_{p,i,t} \geq \sum_{d \in D} V_{p,i,t,d} \quad ; \forall i \in C, t \in T, d \in D \quad (3.34)$$

$$\sum_{p \in P} V_{p,i,t,d} = Z_{i,t,d} \quad ; \forall i \in C, t \in T, d \in D \quad (3.35)$$

$$Z_{i,t,d} = d_{i,t,d} - W_{i,t,d} \quad ; \forall i \in C, t \in T, d \in D \quad (3.36)$$

$$V_{p,i,t,d} \leq \text{Capacidad} \cdot CT_{p,t,d} \quad ; \forall p \in P, i \in C, t \in T, d \in D \quad (3.37)$$

$$\sum_{m \in M(p)} \sum_{i \in C} \sum_{k=0}^{TC_i-1} a_{p,n,m} \cdot X_{p,i,(t-k),m} = 1 \quad ; t-k \geq 0 \quad ; \forall p \in P, t \in T, n \in N(p) \quad (3.38)$$

$$\sum_{k=0}^{TC_i-1} X_{p,i,(t-k),m} = L_{p,i,t,m} \quad ; t - k \geq 0 ; \forall p \in P, i \in C, t \in T, n \in M(p) \quad (3.39)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{i \in C} ne\_alto_i \cdot L_{p,i,t,m} \leq 3 \quad ; \forall p \in P, m \in M(p) \quad (3.40)$$

$$\sum_{t \in T} \left( \sum_{i \in C} ne\_medio_i \cdot L_{p,i,t,m} + \sum_{i \in C} ne\_alto_i \cdot L_{p,i,t,m} \right) \leq 4 \quad ; \forall p \in P, m \in M(p) \quad (3.41)$$

$$\sum_{i \in C} \sum_{t=2}^T X_{p,i,t,m} \leq (T - 1) \cdot \sum_{i \in C} X_{p,i,1,m} \quad ; \forall p \in P, m \in M \quad (3.42)$$

$$\sum_{m \in M(p)} \sum_{i \in C} [(e_{p,m} - 1) \cdot \sigma\_zona_{p,m,n} + (1 - \alpha) \cdot \sigma\_tot_p] \cdot X_{p,i,t,m} \leq (1 - \alpha) \cdot \sigma\_tot_p \cdot Nn_p \quad ; \forall p \in P, t \in T, n \in N(p) \quad (3.43)$$

$$\sum_{m \in M(p)} \sum_{i \in C} X_{p,i,t,m} \leq Cota_p \quad ; \forall p \in P, t \in T \quad (3.44)$$

$$\sum_{i \in F(j)} \sum_{k=0}^{TC_i} X_{p,i,(t-k),m} \leq 1 \quad ; \forall p \in P, t \in T, m \in M(p), j \in FC \quad (3.45)$$

$$\sum_{i \in F(j)} \sum_{k=0}^{TC_i} X_{p,i,(t-k),m} + X_{p,i,(t-k),m'} \leq 1 \quad ; \forall p \in P, t \in T, (m, m') \in Ady(p), j \in FC \quad (3.46)$$

$$X_{p,i,t,m}, L_{p,i,t,m} \in \{0,1\}, Y_{p,i,t,m} \geq 0 \quad ; \forall p \in P, i \in C, t \in T, m \in M(p) \quad (3.47)$$

$$W_{i,t,d}, Z_{i,t,d} \geq 0 \quad ; \forall i \in C, t \in T$$

$$V_{p,i,t,d} \geq 0 \quad ; \forall p \in P, i \in C, t \in T, d \in D$$

$$CT_{p,t,d} \geq 0 \quad ; \forall p \in P, i \in C, t \in T, d \in D$$

Los cambios que presenta este modelo con respecto al modelo ( 3.1)-( 3.15), se discuten a continuación. En primer lugar, la restricción ( 3.45) restringe que en una zona se planten dos cultivos de una misma familia de manera consecutiva, por otro lado la

restricción ( 3.46) establece que en dos zonas adyacentes no es posible plantar cultivos de familias diferentes.

Al igual que en el caso anterior, se procederá a plantear y resolver el problema por medio de un enfoque jerárquico, donde primero se obtiene la partición del terreno compuesto por un conjunto de zonas de manejo. En segundo lugar, se propone resolver un problema de rotación de cultivos para la partición óptima del terreno obtenida en el primer nivel, considerando restricciones de adyacencia, resolviendo un problema lineal entero mixto.

### 3.1.2.2 Enfoque jerárquico del Problema

#### **Problema de Zonificación**

Se trabaja nuevamente con el modelo ( 3.16)-( 3.19) ya descrito, donde la solución obtenida de la partición óptima del terreno de las zonas de manejo para cada productor, serán consideradas para la resolución del segundo nivel del enfoque jerárquico.

#### **Problema de Rotación de Cultivos con Restricciones de Adyacencia**

Al igual que en la sección anterior, posterior a la resolución del problema de zonificación, el segundo nivel propone ahora encontrar el plan de rotación de cultivos óptimo donde se consideran restricciones de adyacencia y sujeto a una partición predeterminada de un terreno, que se obtuvo por medio de la resolución del modelo ( 3.16)-( 3.19).

#### **Conjuntos**

$M(p)^* =$  Zonas potenciales pertenecientes al terreno del productor  $p$ ,  $m \in M(p)^*$



$$\begin{aligned} \text{Min} \sum_{t \in T} \left[ \sum_{p \in P} \sum_{m \in M(p)} \sum_{i \in C} (\text{costoc}_i \cdot e_{p,m} \cdot X_{p,i,t,m}) \right. \\ \left. + \sum_{(p,d) \in \text{link}} (\text{costom}_{(p,d)} \cdot CT_{p,t,d}) + \sum_{d \in D} \sum_{i \in C} \text{costond}_i \cdot W_{i,t,d} \right] \end{aligned} \quad (3.48)$$

**S.a.**

$$Y_{p,i,t,m} = X_{p,i,t,m} \cdot \text{rend}_{p,i,m} \quad ; \forall p \in P, i \in C, t \in T, m \in M(p)^* \quad (3.49)$$

$$X_{p,i,t,m} \leq CP_{p,i,t} \quad ; \forall p \in P, i \in C, t \in T, m \in M(p)^* \quad (3.50)$$

$$\sum_{m \in M(p)^*} Y_{p,i,t} = \sum_{d \in D} V_{p,i,t,d} \quad ; \forall i \in C, t \in T, d \in D \quad (3.51)$$

$$\sum_{p \in P} V_{p,i,t,d} \geq Z_{i,t,d} \quad ; \forall i \in C, t \in T, d \in D \quad (3.52)$$

$$Z_{i,t,d} = d_{i,t,d} - W_{i,t,d} \quad ; \forall i \in C, t \in T, d \in D \quad (3.53)$$

$$V_{p,i,t,d} \leq \text{Capacidad} \cdot CT_{p,t,d} \quad ; \forall p \in P, i \in C, t \in T, d \in D \quad (3.54)$$

$$\sum_{m \in M(p)^*} \sum_{i \in C} \sum_{k=0}^{TC_i-1} X_{p,i,(t-k),m} = 1 \quad ; t-k \geq 0 \quad ; \forall p \in P, t \in T \quad (3.55)$$

$$\sum_{k=0}^{TC_i-1} X_{p,i,(t-k),m} = L_{p,i,t,m} \quad ; t-k \geq 0 \quad ; \forall p \in P, i \in C, t \in T, n \in M(p) \quad (3.56)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{i \in C} ne\_alto_i \cdot L_{p,i,t,m} \leq 3 \quad ; \forall p \in P, m \in M(p) \quad (3.57)$$

$$\sum_{t \in T} \left( \sum_{i \in C} ne\_medio_i \cdot L_{p,i,t,m} + \sum_{i \in C} ne\_alto_i \cdot L_{p,i,t,m} \right) \leq 4 \quad ; \forall p \in P, m \in M(p) \quad (3.58)$$

$$\sum_{i \in F(j)} \sum_{k=0}^{TC_i} X_{p,i,(t-k),m} \leq 1 \quad ; \forall p \in P, t \in T, m \in M(p)^*, j \in FC \quad (3.59)$$

$$\sum_{i \in F(j)} \sum_{k=0}^{TC_i} X_{p,i,(t-k),m} + X_{p,i,(t-k),m'} \leq 1 \quad ; \forall p \in P, t \in T, (m, m') \in \text{Ady}(p), j \in FC \quad (3.60)$$

$$X_{p,i,t,m}, L_{p,i,t,m} \in \{0,1\}, Y_{p,i,t,m} \geq 0 \quad ; \forall p \in P, i \in C, t \in T, m \in M(p) \quad (3.61)$$

$$W_{i,t,d}, Z_{i,t,d} \geq 0 \quad ; \forall i \in C, t \in T$$

$$V_{p,i,t,d} \geq 0 \quad ; \forall p \in P, i \in C, t \in T, d \in D$$

$$CT_{p,t,d} \geq 0 \quad ; \forall p \in P, i \in C, t \in T, d \in D$$

La función objetivo ( 3.48) tiene como objetivo minimizar el costo operacional de la producción de cultivos al igual que el modelo ( 3.31)-( 3.47). La principal diferencia con el modelo presentado en el enfoque integrado es que el modelo ( 3.48)-( 3.61) no considera las restricciones ( 3.42)-( 3.44), las cuales están relacionadas directamente a la delineación de zonas, debido a que ahora el conjunto de zonas de manejo corresponde a aquellas zonas seleccionadas en el primer nivel del enfoque jerárquico.

## 4 RESULTADOS

Para este capítulo, los resultados de los modelos presentados en la sección 3.1 del capítulo anterior se dividirán en dos secciones, en primer lugar se realizará un análisis y comparación de los resultados obtenidos en distintas instancias al ir variando el tamaño de los terrenos y de la misma forma la cantidad de puntos muestreados, entre el modelo jerárquico y el modelo integrado. Este análisis se realizará tanto para los modelos de la sección 3.1.1 como para los de la sección 3.1.2 del capítulo anterior.

Posteriormente, se trabajará con una instancia de 16 puntos muestrales que generan 100 diferentes potenciales zonas de manejo. Para esta sección se busca realizar un análisis y comparación entre los modelos integrados presentados en las secciones 3.1.1 y 3.1.2, entre los resultados obtenidos en las distintas instancias, al ir variando el valor del parámetro  $Cota_p$ .

Cabe mencionar que para este trabajo se consideraron 6 tipos de cultivos distribuidos en 4 familias botánicas más un cultivo de barbecho. Además, los datos de rendimientos utilizados fueron obtenidos de la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA).

Así mismo se consideraron 3 productores agrícolas, quienes poseen terrenos de distintas características, pese a esto, en cada sección de 10mx10m del terreno se tiene un punto muestral con información sobre las propiedades del terreno y su variabilidad, obtenidos a partir del trabajo realizado previamente por Augusto (2018). De la misma forma, el valor del parámetro  $\alpha$ , que representa el nivel de homogeneidad requerido, se fijará en 0,85 siguiendo el trabajo antes mencionado.

Además, el costo de viaje contempla una ida y una vuelta desde la ubicación de cada productor a cada centro de distribución. El rendimiento y la capacidad del vehículo se calcularon en base a las especificaciones técnica del modelo Frontier 2.5 marca Kia.

Por último, se utilizó el Solver CPLEX 12.9.0.0 en un computador con procesador Intel Core i5 de 1,7GHz y 4GB de RAM.

## 4.1 Análisis de los Puntos Muestrales

Se comenzó por resolver el problema de delineación de zonas de manejo para cada instancia, para luego, una vez obtenido el resultado de la partición, se utilicen estos valores como input para el problema de planificación de rotación de cultivos.

La Tabla 4.1 contiene los resultados del problema de delineación de zonas de manejo para cada productor. En la primera columna se ubica la instancia que se resolvió, en la segunda columna se encuentra el número de puntos muestrales para las dimensiones del terreno analizado en cada instancia, en la tercera columna está el número total de zonas de manejo potenciales, en la cuarta, quinta y sexta columna se encuentra el valor óptimo de zonas de manejo para cada productor, por último, la séptima columna corresponde al tiempo de resolución.

**Tabla 4.1.** Resultados del problema de zonificación para cada productor.

Instancia	N	M	M*  Productor 1	M*  Productor 2	M*  Productor 3	Tiempo [s]
1	27	108	7	3	7	0,141
2	36	180	5	4	8	0,031
3	48	300	6	7	10	0,031
4	60	450	6	10	12	0,031
5	150	2.475	8	16	22	0,156

(Fuente: Elaboración propia).

Para la instancia 1, el terreno de cada productor se distribuyó en 9 celdas, que dio lugar a 36 zonas potenciales. Luego para la instancia 2, el terreno de cada productor se distribuyó en 12 celdas, para la instancia 3, 4 y 5 los terrenos se distribuyeron en 16, 20 y 50 celdas respectivamente.

A partir de lo expresado en el párrafo anterior y de los resultados expuestos, se puede apreciar que, si bien el tamaño de los terrenos fue el mismo para todos los productores, variando únicamente según la instancia, el valor objetivo de las potenciales

zonas de manejo es distinto para cada productor, esto se debe a que las propiedades del suelo variaban según el terreno. Por otro lado, se observa que es el Productor 3 quien en todas las instancias presenta la mayor cantidad de zonas de manejo, esto se puede deber a que las propiedades del terreno presentan una mayor variación en comparación a los terrenos de los otros dos productores. Por último, la Figura 4.1 busca esquematizar los resultados aquí planteados, representando la distribución del terreno para cada productor según la instancia en estudio.

**Figura 4.1.** Distribución del terreno de cada productor según la instancia en estudio.

	Instancia 1	Instancia 2	Instancia 3	Instancia 4	Instancia 5																																																																																																														
<b>Productor 1</b>	<table border="1"><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td>4</td><td>5</td><td>6</td></tr><tr><td>7</td><td>8</td><td>9</td></tr></table>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	<table border="1"><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td>4</td><td>5</td><td>6</td></tr><tr><td>7</td><td>8</td><td>9</td></tr><tr><td>10</td><td>11</td><td>12</td></tr></table>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	<table border="1"><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr><tr><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td></tr><tr><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td></tr><tr><td>13</td><td>14</td><td>15</td><td>16</td></tr></table>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	<table border="1"><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr><tr><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td></tr><tr><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td></tr><tr><td>13</td><td>14</td><td>15</td><td>16</td></tr><tr><td>17</td><td>18</td><td>19</td><td>20</td></tr></table>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	<table border="1"><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td></tr><tr><td>11</td><td>12</td><td>13</td><td>14</td><td>15</td><td>16</td><td>17</td><td>18</td><td>19</td><td>20</td></tr><tr><td>21</td><td>22</td><td>23</td><td>24</td><td>25</td><td>26</td><td>27</td><td>28</td><td>29</td><td>30</td></tr><tr><td>31</td><td>32</td><td>33</td><td>34</td><td>35</td><td>36</td><td>37</td><td>38</td><td>39</td><td>40</td></tr><tr><td>41</td><td>42</td><td>43</td><td>44</td><td>45</td><td>46</td><td>47</td><td>48</td><td>49</td><td>50</td></tr></table>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50			
1	2	3																																																																																																																	
4	5	6																																																																																																																	
7	8	9																																																																																																																	
1	2	3																																																																																																																	
4	5	6																																																																																																																	
7	8	9																																																																																																																	
10	11	12																																																																																																																	
1	2	3	4																																																																																																																
5	6	7	8																																																																																																																
9	10	11	12																																																																																																																
13	14	15	16																																																																																																																
1	2	3	4																																																																																																																
5	6	7	8																																																																																																																
9	10	11	12																																																																																																																
13	14	15	16																																																																																																																
17	18	19	20																																																																																																																
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10																																																																																																										
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20																																																																																																										
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30																																																																																																										
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40																																																																																																										
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50																																																																																																										
<b>Productor 2</b>	<table border="1"><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td>4</td><td>5</td><td>6</td></tr><tr><td>7</td><td>8</td><td>9</td></tr></table>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	<table border="1"><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td>4</td><td>5</td><td>6</td></tr><tr><td>7</td><td>8</td><td>9</td></tr><tr><td>10</td><td>11</td><td>12</td></tr></table>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	<table border="1"><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr><tr><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td></tr><tr><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td></tr><tr><td>13</td><td>14</td><td>15</td><td>16</td></tr></table>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	<table border="1"><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr><tr><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td></tr><tr><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td></tr><tr><td>13</td><td>14</td><td>15</td><td>16</td></tr><tr><td>17</td><td>18</td><td>19</td><td>20</td></tr></table>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	<table border="1"><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td></tr><tr><td>11</td><td>12</td><td>13</td><td>14</td><td>15</td><td>16</td><td>17</td><td>18</td><td>19</td><td>20</td></tr><tr><td>21</td><td>22</td><td>23</td><td>24</td><td>25</td><td>26</td><td>27</td><td>28</td><td>29</td><td>30</td></tr><tr><td>31</td><td>32</td><td>33</td><td>34</td><td>35</td><td>36</td><td>37</td><td>38</td><td>39</td><td>40</td></tr><tr><td>41</td><td>42</td><td>43</td><td>44</td><td>45</td><td>46</td><td>47</td><td>48</td><td>49</td><td>50</td></tr></table>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50			
1	2	3																																																																																																																	
4	5	6																																																																																																																	
7	8	9																																																																																																																	
1	2	3																																																																																																																	
4	5	6																																																																																																																	
7	8	9																																																																																																																	
10	11	12																																																																																																																	
1	2	3	4																																																																																																																
5	6	7	8																																																																																																																
9	10	11	12																																																																																																																
13	14	15	16																																																																																																																
1	2	3	4																																																																																																																
5	6	7	8																																																																																																																
9	10	11	12																																																																																																																
13	14	15	16																																																																																																																
17	18	19	20																																																																																																																
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10																																																																																																										
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20																																																																																																										
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30																																																																																																										
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40																																																																																																										
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50																																																																																																										
<b>Productor 3</b>	<table border="1"><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td>4</td><td>5</td><td>6</td></tr><tr><td>7</td><td>8</td><td>9</td></tr><tr><td>10</td><td>11</td><td>12</td></tr></table>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	<table border="1"><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td>4</td><td>5</td><td>6</td></tr><tr><td>7</td><td>8</td><td>9</td></tr><tr><td>10</td><td>11</td><td>12</td></tr></table>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	<table border="1"><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr><tr><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td></tr><tr><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td></tr><tr><td>13</td><td>14</td><td>15</td><td>16</td></tr></table>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	<table border="1"><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr><tr><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td></tr><tr><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td></tr><tr><td>13</td><td>14</td><td>15</td><td>16</td></tr><tr><td>17</td><td>18</td><td>19</td><td>20</td></tr></table>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	<table border="1"><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td></tr><tr><td>11</td><td>12</td><td>13</td><td>14</td><td>15</td><td>16</td><td>17</td><td>18</td><td>19</td><td>20</td></tr><tr><td>21</td><td>22</td><td>23</td><td>24</td><td>25</td><td>26</td><td>27</td><td>28</td><td>29</td><td>30</td></tr><tr><td>31</td><td>32</td><td>33</td><td>34</td><td>35</td><td>36</td><td>37</td><td>38</td><td>39</td><td>40</td></tr><tr><td>41</td><td>42</td><td>43</td><td>44</td><td>45</td><td>46</td><td>47</td><td>48</td><td>49</td><td>50</td></tr></table>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
1	2	3																																																																																																																	
4	5	6																																																																																																																	
7	8	9																																																																																																																	
10	11	12																																																																																																																	
1	2	3																																																																																																																	
4	5	6																																																																																																																	
7	8	9																																																																																																																	
10	11	12																																																																																																																	
1	2	3	4																																																																																																																
5	6	7	8																																																																																																																
9	10	11	12																																																																																																																
13	14	15	16																																																																																																																
1	2	3	4																																																																																																																
5	6	7	8																																																																																																																
9	10	11	12																																																																																																																
13	14	15	16																																																																																																																
17	18	19	20																																																																																																																
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10																																																																																																										
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20																																																																																																										
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30																																																																																																										
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40																																																																																																										
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50																																																																																																										

(Fuente: Elaboración propia).

Luego se procedió a resolver, en primer lugar, los modelos presentados en la sección 3.1.1, los cuales consideran un sistema convencional de producción de cultivos, partiendo por el modelo jerárquico, que en otras palabras, significa una vez obtenido el resultado de la partición, se utiliza como input para el problema de planificación de rotación de cultivos.

La Tabla 4.2. Resultados del problema jerárquico para un sistema de producción de cultivos convencional. En la primera columna se ubica la instancia que se resolvió, en la segunda columna se encuentra el número de puntos muestrales para las dimensiones del terreno analizado en cada instancia, en la tercera columna está el número total de zonas de manejo potenciales, la cuarta columna corresponde al número óptimo de zonas de manejo; cabe mencionar que para facilitar la resolución del problema, la cantidad de puntos

muestrales para cada productor es la misma, por lo que los valores señalados en la segunda, tercera y cuarta columna corresponden a la suma de los valores asociados a los tres productores. La quinta columna muestra el valor óptimo obtenido del costo total, al resolver el problema de rotación de cultivos utilizando los valores obtenidos en el problema de zonificación, la sexta columna corresponde al tiempo de resolución del problema jerárquico.

**Tabla 4.2.** Resultados del problema jerárquico para un sistema de producción de cultivos convencional.

Instancia	N	M	M*	Costo Total [CLP\$]	Tiempo [s]
1	27	108	17	1.371.565	20,42
2	36	180	17	1.535.286	15,59
3	48	300	23	1.413.390	35,69
4	60	450	28	1.358.785	49,00
5	150	2.475	46	1.351.738	28,69

(Fuente: Elaboración propia).

En general se puede apreciar que la cantidad óptima de zonas de manejo aumentan a medida que el terreno incrementa su tamaño, al contrario de esto, se puede ver que el costo total va decreciendo a excepción de la instancia 2, que a su vez presenta el menor tiempo de resolución. Además, se puede observar que el valor óptimo de las zonas de manejo en la instancia 5 es aproximadamente 3 veces la cantidad de zonas de manejo respecto a la instancia 1 y 2.

Posteriormente se resolvió el enfoque integrado, cuyos resultados se detallan en la Tabla 4.3, donde la primera columna corresponde a la instancia que se resolvió, en la segunda columna se encuentra el número de puntos muestrales para las dimensiones del terreno analizado, la tercera columna es la cota superior para el número total de zonas de manejo, la cuarta columna muestra el costo total del proceso de cultivo y cosecha, por último, la quinta columna es el tiempo de resolución para el enfoque integrado.

**Tabla 4.3.** Resultados del problema integrado para un sistema de producción convencional.

Instancia	N	Cota Superior	Costo Total [CLP\$]	Tiempo [s]
1	27	17	1.367.062	120,2
2	36	17	1.451.359	3.222,97
3	48	23	1.410.840	701,03
4	60	28	1.345.352	4.243,94
5	150	46	1.349.202	51.577,00

(Fuente: Elaboración propia).

Se puede apreciar que los valores del tiempo de resolución aumentan considerablemente en el enfoque integrado, donde la mayor diferencia se puede ver en la instancia 5. En el caso de los costos totales, se puede apreciar que van disminuyendo a medida que aumenta el número de puntos muestreados, con excepción de la instancia 2.

En la Tabla 4.4 la primera columna es la instancia que se resolvió, la segunda columna muestra los costos de cultivar para el enfoque jerárquico mientras que la tercera columna corresponde a los costos de cultivar para el enfoque integrado. Por último, en la cuarta columna se presenta el porcentaje de reducción en los costos.

**Tabla 4.4.** Comparación entre los enfoques jerárquico e integrado para un sistema de producción de cultivos convencional.

Instancia	Costo Enfoque Jerárquico	Costo Enfoque Integrado	% Reducción
1	1.371.565	1.367.062	0,33%
2	1.535.286	1.451.359	5,47%
3	1.413.390	1.410.840	0,18%
4	1.358.785	1.345.352	0,99%
5	1.351.738	1.349.202	0,19%

(Fuente: Elaboración propia).

Se observa, que el enfoque integrado representa una reducción en los costos totales de producción. Tal reducción se debe a que el enfoque integrado considera simultáneamente los distintos factores que inciden en el problema, por lo que al tomar la decisión óptima, toma en consideración todos los factores a la vez, en cambio el enfoque jerárquico al resolver primero el problema de zonificación no considera como podría

afectar posteriormente a la cadena de suministro. La mayor reducción en los costos se presenta en la instancia 2, llegando a una diferencia sobre un 5%.

A continuación, se procederá a realizar el mismo análisis para los resultados de los modelos de la sección 3.1.2 respecto al sistema de producción de cultivos orgánicos. Al igual que en el caso anterior, se comenzó por resolver el enfoque jerárquico, cuyo resultados se reflejan en la Tabla 4.5, la cual se encuentra distribuida de igual manera que la Tabla 4.2.

**Tabla 4.5.** Resultados del problema jerárquico para un sistema de producción de cultivos orgánicos.

Instancia	N	M	M*	Costo Total [CLP\$]	Tiempo [s]
1	27	108	17	1.408.989	30,81
2	36	180	17	1.737.179	7,23
3	48	300	23	1.458.960	35,52
4	60	450	28	1.362.635	83,84
5	150	2.475	46	1.373.629	41,00

(Fuente: Elaboración propia).

Se puede apreciar en primera instancia que el valor óptimo de la cantidad de zonas de manejo va aumentando conforme aumenta la cantidad de puntos muestreados en el terreno. Con relación al costo total de cultivo, se puede apreciar un aumento considerable del costo en la instancia 2, y que representa el menor tiempo de resolución. Por otro lado, en comparación a los resultados del sistema de producción convencional de cultivos que se detallan en la Tabla 4.2, en todas las instancias se puede apreciar un aumento en el costo total de cultivo.

Posteriormente se resolvió el enfoque integrado en un sistema de producción de cultivos orgánicos, donde los resultados se encuentran plasmados en la Tabla 4.6 que se encuentra distribuida de igual manera que la Tabla 4.3.



**Tabla 4.6.** Resultados del problema integrado para un sistema de producción de cultivos orgánicos.

Instancia	N	Cota Superior	Costo Total [CLP\$]	Tiempo [s]
1	27	17	1.402.062	2.161,00
2	36	17	1.572.260	39.742,00
3	48	23	1.450.920	8.313,08
4	60	28	1.358.785	45.642,20
5	150	46	1.367.012	151.577,00

(Fuente: Elaboración propia).

Se puede observar que la instancia 2 es la que representa los valores más elevados en lo que respecta al costo total, esto se repitió en los cuatro modelos resueltos en esta sección. Pese a esto se puede observar cómo los costos disminuyen a medida que aumenta la cantidad de puntos muestreados.

Al comparar los resultados aquí obtenidos con los de la Tabla 4.3, en primer lugar, se puede apreciar que el valor del costo total de cultivo es mayor cuando se trabaja con un sistema de producción orgánico. Por otro lado, este modelo representa los mayores tiempos de resolución en comparación a los otros modelos descritos.

A continuación, se procedió a comparar los resultados de ambos enfoques resueltos para un sistema de producción orgánico, lo cual queda plasmado en la Tabla 4.7 la que se distribuye de igual manera que la Tabla 4.4.

**Tabla 4.7.** Comparación entre los enfoques jerárquico e integrado para un sistema de producción de cultivos orgánicos.

Instancia	Costo Enfoque Jerárquico	Costo Enfoque Integrado	% Reducción
1	1.408.989	1.402.062	0,49%
2	1.737.179	1.572.260	9,49%
3	1.458.960	1.450.920	0,55%
4	1.362.635	1.358.785	0,28%
5	1.349.202	1.367.012	0,48%

(Fuente: Elaboración propia).

Se puede apreciar que al igual que ocurre para el sistema de producción convencional, el enfoque integrado representa disminución en los costos totales de cultivo, pese a esto, tal aumento no supera el 1% con excepción de la instancia 2, donde el aumento de los costos es de un 9,49%, que representa la mayor diferencia entre ambos enfoques.

Por último, al observar que la diferencia de ambos enfoques no representa una diferencia considerable, se procedió a comparar y analizar la diferencia entre los costos que existe entre ambos sistemas de producción. Tales resultados se presentan en la Tabla 4.8, donde la primera columna corresponde a la instancia que se resolvió, la segunda columna muestra el costo total de cultivar en un sistema de producción convencional, mientras que la tercera columna corresponde al costo total de cultivar para un sistema de producción orgánico. Por último, en la cuarta columna se presenta el porcentaje de aumento en los costos.

**Tabla 4.8.** Comparación del sistema de producción convencional y producción orgánica en su enfoque jerárquico.

Instancia	Costo Sistema de Producción Convencional	Costo Sistema de Producción Orgánico	% Aumento
1	1.371.565	1.408.989	2,73%
2	1.535.286	1.737.179	13,15%
3	1.413.390	1.458.960	3,22%
4	1.358.785	1.362.635	0,28%
5	1.351.738	1.373.629	1,62%

(Fuente: Elaboración propia).

Se observa que, para cada una de las instancias, trabajar con un sistema de producción orgánico representa un aumento en los costos totales. Aun así, tal aumento no resulta ser significativo y no supera el 4%, con excepción de la instancia 2, que además de contar con los mayores costos totales en ambos sistemas de producción, también considera el mayor aumento entre un sistema a otro.

## 4.2 Análisis de la Cota Superior

A partir de los resultados obtenidos, se consideró la instancia 3 de la sección 4.1 para extender el análisis. Tal instancia se seleccionó porque representa la menor variación en los resultados entre ambos enfoques.

Se resolvió en 5 diferentes instancias el modelo integrado para el caso de un sistema de producción convencional y de la misma forma para un sistema de producción orgánico. Se colocó en un comienzo como cota superior, el número de zonas para cada productor obtenido en el problema de delineación de zonas. La cota para cada uno de los productores fue aumentando en un 25% en cada instancia, esto de igual manera para ambos sistemas de producción.

En la Tabla 4.9 la primera columna corresponde a la instancia que se resolvió, la segunda columna corresponde a la cota superior para el número total de zonas de manejo, la tercera columna es el valor total óptimo de zonas de manejo, la cuarta columna muestra el costo total de cultivo para un sistema productivo convencional, por último, la quinta columna es el tiempo de resolución.

**Tabla 4.9.** Resultados del problema integrado para un sistema de producción de cultivos convencional.

Instancia	Cota superior	M*	Costo Total [CLP\$]	Tiempo [s]
3.1	23	23	1.410.840	701,03
3.2	30	30	1.339.543	4.480,33
3.3	35	28	1.335.693	3.066,41
3.4	39	33	1.335.040	4.245,78
3.5	42	32	1.334.387	325,27

(Fuente: Elaboración propia).

Se puede apreciar que a partir de la instancia 3.3, la cantidad óptima de zonas de manejo resulta menor a la cota superior establecida, sin mantener una tendencia entre las instancias. Los costos en cambio van disminuyendo a medida que la cota superior aumenta. El menor tiempo de resolución se presenta en la instancia 3.5 y el mayor tiempo de resolución se encuentra en la instancia 3.2, pese a que el menor y mayor tiempo de

resolución se encuentra en los extremos, se aprecia que tampoco existe una tendencia entre las instancias.

A continuación, la Tabla 4.10 se distribuye de igual forma que la Tabla 4.8 y plasma los resultados obtenidos para un sistema de producción orgánico, el cual considera restricciones respecto a la adyacencia de cultivos de una misma familia hortícola.

**Tabla 4.10.** Resultados del problema integrado para un sistema de producción de cultivos orgánicos.

Instancia	Cota superior	M*	Costo Total [CLP\$]	Tiempo [s]
3.1	23	23	1.450.920	8.313,08
3.2	30	29	1.347.379	8.853,17
3.3	35	31	1.343.498	3.372,70
3.4	39	23	1.339.543	4.744,25
3.5	42	34	1.335.693	1.519,73

(Fuente: Elaboración propia).

Al igual que en el caso anterior, se puede apreciar que a partir de la instancia 3.2, la cantidad óptima de zonas de manejo resulta ser menor a la cota superior establecida. Donde se destaca la instancia 3.4, cuyo valor óptimo de zonas de manejo es el mismo que el resultado obtenido en el problema de delineación de zonas.

En relación a los costos, se puede apreciar que estos se van reduciendo a medida que aumenta el valor de la cota superior. Por otro lado, se puede apreciar que al igual que en el caso anterior, la instancia 3.2 es la que considera un mayor tiempo de resolución y la instancia 3.5 considera el menor tiempo de resolución.

La Tabla 4.11 se distribuye de igual forma que la Tabla 4.8 y contiene los resultados de los costos totales de ambos sistemas de producción y la diferencia porcentual entre ambos.

**Tabla 4.11.** Comparación del sistema de producción convencional y producción orgánica en su enfoque integrado.

Instancia	Costo Sistema de Producción Convencional	Costo Sistema de Producción Orgánico	% Aumento
3.1	1.410.840	1.450.920	2,84%
3.2	1.339.543	1.347.379	0,58%
3.3	1.335.693	1.343.498	0,58%
3.4	1.335.040	1.339.543	0,34%
3.5	1.334.387	1.335.693	0,10%

(Fuente: Elaboración propia).

Para todas las instancias, el sistema de producción orgánico significa un aumento en el costo total de la cadena de abastecimiento. Pese a esto, se puede apreciar que tal aumento en los costos no supera el 3%, siendo la instancia 3.1 que representa el mayor aumento de en los costos totales.

## 5 CONCLUSIONES

En este trabajo de memoria se proponen dos sistemas de producción de cultivos, que a su vez consideran dos enfoques diferentes para los problemas de zonificación y planificación de cosecha selectiva. El primer enfoque resuelto fue un enfoque jerárquico, que descompone el problema en dos modelos de optimización, un problema de delineación de zonas de manejo, para luego resolver un problema de planificación de rotación de cultivos en las zonas definidas en un comienzo. El segundo enfoque trata de un modelo de optimización integrado, que considera de manera simultánea la determinación de la delineación de las zonas de manejo y un plan de rotación de cultivos para las zonas a seleccionar.

En el trabajo se incluyen condiciones con respecto al nivel extractivo de nutrientes de los cultivos y para el caso particular de la planificación de rotación de cultivos del sistema orgánico, se considera restricciones que aumentan la exigencia del modelo, considerando la adyacencia de cultivos para una misma familia botánica en diferentes zonas de manejo. Cumpliendo a la vez con una demanda agregada en los centros de distribución de la cadena de abastecimiento.

De los resultados obtenidos en la sección 4.1, se puede observar que, para ambos sistemas de producción, la reducción de los costos entre el enfoque jerárquico y el enfoque integrado, no supero el 1%, con excepción de la instancia 2. Dado esto y por la cantidad de tiempo que implica la resolución del enfoque integrado, se puede concluir que resulta apropiado resolver este problema con un enfoque jerárquico. En la misma línea, se pudo apreciar que la mayor reducción en costos es de 9,49% y se presentó en el sistema de producción orgánico para la instancia 2, sin una reducción significativa en las otras instancias, confirmando la conveniencia del uso del esquema jerárquico para la resolución del problema.

Con respecto a los resultados presentados en la sección 4.2, si bien los costos totales se van reduciendo a medida que existe una mayor holgura en la cantidad máxima de zonas de manejo que es posible trabajar, los costos de cultivo son mayores para un sistema de

producción de cultivos orgánicos. En esta misma línea, la mayor diferencia entre los costos de ambos sistemas de producción corresponde a un 2,84%, que no representaría un aumento considerable para los productores con respecto a los costos, que al contrastarlo con los beneficios mencionados en este trabajo, donde se mantendría en el tiempo la productividad de la superficie agrícola, podría resultar conveniente incurrir en este gasto.

Esta última idea resulta ser relevante de destacar, ya que tanto en los resultados expuestos en la Tabla 4.8 como en la Tabla 4.11, se puede apreciar que el aumento en los costos para la producción de cultivos orgánicos no resulta ser significativo, más aun si también se consideran los beneficios ya antes mencionados de esta práctica agrícola.

En futuros trabajos de investigación, podría ser interesante considerar, por un lado, la variabilidad de las propiedades del terreno entre un periodo y otro y como esto afectará en la toma de decisiones; en la misma línea resultaría relevante considerar algún parámetro que permita medir el deterioro/gasto microbiológico de los suelos, para realizar una mejor comparación entre ambos sistemas de producción. También sería interesante considerar en estudios futuros la variabilidad de la demanda y de esta forma resolver un modelo de optimización estocástico. Además, resultaría relevante ampliar la línea de investigación, integrando a la cadena de suministro a los productores y a los comercializadores, considerando de esta manera las restricciones que puedan incidir en cada caso en particular.

Para finalizar, es importante destacar la importancia de este trabajo de memoria en términos del aporte que puede significar este modelo, ya sea como una base para futuros trabajos o en sí mismo en el ámbito de la sostenibilidad agrícola, pues a través de un manejo sustentable del uso de recursos, un menor uso de pesticidas, una mejor planificación de los cultivos que considere ciertos factores naturales que existen entre distintos cultivos y otros factores; será posible no tan solo cuidar la productividad a largo plazo de los suelos agrícolas, lo que permitirá una mayor proyección y estabilidad de ingresos, sino que también cuidar los suministros de alimentos de la población, abarcando de esta forma los tres ejes de la sostenibilidad, que considera los ámbitos económicos, ambientales y sociales.

## 6 REFERENCIAS

- Agosto, G. (2018). *Memoria en Delineación de Zonas de Manejo y Planificación Sustentable de Cultivos Bajo Condiciones de Incertidumbre en las Propiedades del Suelo*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Industrial, Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago, Chile. [1.1](#), [3.1](#), [1](#)
- Ahumada, O., & Villalobos, J. (2009). Application of planning models in the agri-food supply chain: A review. *European Journal of Operation Research*, 1-20. [2.3](#)
- Albornoz, V. M., Véliz, M. I., Ortega, R., & Ortiz-Araya, V. (2020). Integrated versus hierarchical approach for zone delineation and crop planing under uncertainty. *Springer*, 617-634. [1.1](#), [2.2](#)
- Albornoz, V., & Urrutia-Gutiérrez, C. (2018). A mixed-integer linear optimization model for a two-echelon agribusiness supply chain. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 253-260. [1.1](#), [2.3](#)
- Behzadi, G., O'Sullivan, M. J., Olsen, T. L., & Zhang, A. (2018). Agribusiness supply chain risk management : A review of quantitative decision models R. *Omega*, 21-42. [1.1](#)
- Capitanescu, F., Marvuglia, A., Navarrete Gutiérrez, T., & Benetto, E. (2017). Multi-stage farm management optimization under environmental and crop rotation constraints. *Journal of Cleaner Production*, 197-205. [2.2](#)
- Cid-garcia, N. M., Albornoz, V. M., Rios-solis, Y. A., & Ortega, R. (2013). Rectangular shape management zone delineation using integer linear programming. *Computers and Electronics in Agriculture*, 199-208. [1.1](#), [2.2](#)
- Diaz, N. (2006). Asociaciones y Rotaciones de Cultivos. En *Prácticas de Horticultura Ecológica* (págs. 79-84). Junta de Castilla y León, España: Servicio de Formación Agraria e Iniciativas. [2.1](#)



- Dos Santos, L. M., Michelon, P., Arenales, M. N., & Santos, R. H. (2011). Crop rotation scheduling with adjacency constraints. *Annals of Operations Research*, 165-180. [2.2](#)
- IFOAM. (2008a). *IFOAM Organics International*. Obtenido de Organic Agriculture & Healthy Soils: <https://www.ifoam.bio/en/core-campaigns/organic-agriculture-soils>. [1.1](#)
- IFOAM. (2008b). *IFOAM Organics International*. Obtenido de Organic Agriculture & Healthy Soils: [https://www.ifoam.bio/sites/default/files/oa\\_and\\_soils\\_web.pdf](https://www.ifoam.bio/sites/default/files/oa_and_soils_web.pdf). [1.1](#)
- Kremen, C. (13 de Junio de 2013). *InfoAgro*. Obtenido de Agricultura Orgánica vs Agricultura Convencional: Comparación del rendimiento productivo: <http://mexico.infoagro.com/agricultura-organica-vs-agricultura-convencional-comparacion-del-rendimiento-productivo/>. [2.1](#)
- Nahmias, S. (2007). Administración de la cadena de abastecimiento. En *Análisis de la producción y las operaciones* (págs. 294-343). Mexico: Mc Graw Hill. [2.3](#)
- Nguyen, C., Goff, Z., & Accorsi, R. (2019). Mathematical modeling of food and agriculture distribution. En R. Arcossi, & M. Riccardo, *Sustainable Food Supply Chains: Planning, Design, and Control through Interdisciplinary Methodologies* (pág. 145.158). Academic Press. [2.3](#)
- ODEPA. (2018). Comisión Nacional de Agricultura Orgánica. En SAG (Ed.), (págs. 1-43). Santiago, Chile. [2.1](#)
- Ortega, R. A., & Santibáñez, O. A. (2007). Determination of management zones in corn (*Zea mays* L.) based on soil fertility. *Computers and Electronics in Agriculture*, 49-59. [2.2](#)
- Qualitas Agroconsultores Ltda. (2019). *Caracterización de la cadena nacional de productos orgánicos*. Santiago: Oficina de Estudios y Políticas Agrarias del Ministerio de Agricultura. [2.1](#)

- SAG. (2010). Ley 20.089. *Sistema nacional de certificación de productos orgánicos agrícolas*. Santiago, Chile: División de Protección de los Recursos Naturales Renovables Servicio Agrícola y Ganadero. [1.1](#), [2.1](#)
- SAG. (2013). *Agricultura Orgánica Nacional: Bases Técnicas y situación actual*. Ministerio de Agricultura, División de Protección de Recursos Naturales Renovables, Santiago, Chile. [2.1](#)
- SAG. (2018). *Datos de producción orgánica temporada 2018*. Santiago: División de Protección de los Recursos Naturales Renovables, Departamento de Agricultura. [2.1](#)
- Seufert, V., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2012). Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature*, 229-234. [2.1](#)
- Silva, P., Vergara, W., & Acevedo, E. (2015). Rotación de cultivos. En C. S. Ruiz, *Rastrojos de cultivos y residuos forestales. Programa de Transferencia de Prácticas Alternativas al Uso del Fuego en la Región del Biobío*. Boletín INIA N° 308 (págs. 48-67). Chillan, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias. [2.2](#)
- Vásquez, C., Céspedes, C., Paillán, H., & Vargas, S. (2012). Manejo Orgánico de Cultivos Hortícolas. En C. L. Céspedes, *Producción Hortofrutícola Orgánica*. Boletín INIA N° 232 (págs. 80-110). Chillan, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias. [2.1](#)

# 7 ANEXOS

## Anexo A

**Figura 7.1.** Código en AMPL archivo.mod para un modelo de delineación de zonas de manejo.

```
# Modelo de optimización problema de delineación de zonas

## CONJUNTOS ##
set P; # Productores p=1..P
set M{P}; # Zonas potenciales m=1..M[p], p=1..P
set N{P}; # Puntos muestrales

## PARÁMETROS ##
param a {p in P,M[p],N[p]};
param vz {p in P, M[p]};
param vz_total {P};
param alpha;
param Nn {P};

## VARIABLES DE DECISIÓN ##
var zona {p in P,M[p]}, binary;

## FUNCIÓN OBJETIVO ##
minimize Zonas {p in P} :
    (sum {m in M[p]} zona[p,m]);

## RESTRICCIONES ##
subject to r1 {p in P,n in N[p]}:
    sum {m in M[p]} (a[p,m,n]*zona[p,m])=1;

subject to r2 {p in P}:
    (1-alpha)*vz_total[p]*(Nn[p]-(sum {m in M[p]} zona[p,m]))>= (sum {m in M[p]} vz[p,m]*zona[p,m]);
```

(Fuente: AMPL IDE .mod).

## Anexo B

**Figura 7.2.** Código en AMPL archivo.mod para un modelo de rotación de cultivos convencionales con enfoque jerárquico.

```
#SISTEMA DE PRODUCCIÓN: Convencional
#ENFOQUE JERARQUICO: Plan óptimo de rotación de cultivos
## CONJUNTOS ##
set P; # Productores p=1..P
set C; # Cultivos i=1..C
param T; # Periodos [semanas] t=1..T
set M{P}; # zonas potenciales m=1..M[p], p=1..P
set D; # Centro de distribución
set link within (P cross D);# Arcos entre los nodos
param T1 ; #Periodo de tiempo T1 en el horizonte de planificación
param T2 ; #Periodo de tiempo T2 en el horizonte de planificación
param T3 ; #Periodo de tiempo T3 en el horizonte de planificación
```

```

## PARAMETROS ##
param a {p in P,M[p],N[p]};
param C_prod {P, C,1..T};
param T_cult {C};
param dda {C,1..T,D};
param capacidad;
param c_plant {C};
param c_ndda {C};
param c_mov {link};
param rend {p in P,C,M[p]};
param alto_ne {C}, binary;
param medio_ne {C}, binary;

## VARIABLES DESECCIÓN ##
var X {p in P, C, t in 1..T, M[p]}, binary;
var CT {P,t in 1..T,D}, >=0 integer;
var W {i in C, t in 1..T, d in D}, >=0;
var Y {p in P, C, t in 1..T, M[p]}, >=0;
var V {P, C, t in 1..T, D}, >=0 ;
var Z {C, t in 1..T, D}, >=0 ;
var L { p in P, C, t in 1..T, M[p]}, binary;

## FUNCIÓN OBJETIVO ##
minimize Total_costo_M2:
  (sum{t in 1..T}
    (sum{p in P,i in C,m in M[p]} ((c_plant[i]*e[p,m])*X[p,i,t,m])
      sum{(p,d) in link} (c_mov[p,d]*CT[p,t,d]) +
      sum{i in C, d in D}(c_ndda[i]*W[i,t,d]))));

## RESTRICCIONES ##
subject to r1 {p in P, i in C, t in 1..T, m in M[p]}:
  Y[p,i,t,m] = X[p,i,t,m]*(rend[p,i,m]);

subject to r2 {p in P, i in C, t in 1..T, m in M[p]}:
  X[p,i,t,m] <= C_prod[p,i,t];

subject to r3 {p in P, i in C, t in 1..T}:
  sum {m in M[p]} Y[p,i,t,m] >= sum {d in D} V[p,i,t,d];

subject to r4 {i in C, t in 1..T, d in D}:
  sum {p in P} V[p,i,t,d] = Z[i,t,d];

subject to r5 {p in P, i in C, t in 1..T, d in D}:
  Z[i,t,d] = dda[i,t,d] - W[i,t,d] ;

subject to r6 {p in P, i in C, t in 1..T, d in D}:
  V[p,i,t,d] <= capacidad*CT[p,t,d];

subject to r7 {p in P, t in 1..T}:
  sum {m in M[p], i in C, k in 0..(T_cult[i]-1):t-k>0} X[p,i,t-k,m] = 1;

subject to r8 {p in P, i in C, t in 1..T, m in M[p]}:
  sum { k in 0..(T_cult[i]-1):t-k>0} X[p,i,t-k,m]=L[p,i,t,m];

subject to r9a {p in P, m in M[p]}:
  sum {i in C, t in 1..T1} alto_ne[i]*L[p,i,t,m] <=3;

subject to r9b {p in P, m in M[p]}:
  sum {i in C, t in 2..T2} alto_ne[i]*L[p,i,t,m] <=3;

subject to r9c {p in P, m in M[p]}:
  sum {i in C, t in 3..T3} alto_ne[i]*L[p,i,t,m] <=3;

subject to r10a {p in P, m in M[p]}:
  sum{t in 1..T2}(sum {i in C} medio_ne[i]*L[p,i,t,m]+ sum {j in C} alto_ne[j]*L[p,j,t,m]) <=4;

subject to r10b {p in P, m in M[p]}:
  sum {t in 2..T3}(sum {i in C} medio_ne[i]*L[p,i,t,m]+ sum {j in C} alto_ne[j]*L[p,j,t,m]) <=4;

```

(Fuente: AMPL IDE .mod).

## Anexo C

**Figura 7.3.** Código en AMPL archivo.mod para un modelo de delineación de zonas de manejo y plan de rotación de cultivos convencionales en su enfoque integrado.

```

#SISTEMA DE PRODUCCIÓN: Convencional
#ENFOQUE INTEGRADO: Elección óptima de delimitación de zonas de manejo
#                               y un plan óptimo de rotación de cultivos

## CONJUNTOS ##
set P;           # Productores  p=1..P
set C;           # Cultivos    i=1..C
param T;        # Periodos [semanas] t=1..T
set M{P};       # zonas potenciales m=1..M[p], p=1..P
set N{P};       # Puntos muestrales
set D;          # Centro de distribución
set link within (P cross D); # Arcos entre los nodos
param T1 ;     #Periodo de tiempo T1 en el horizonte de planificación
param T2 ;     #Periodo de tiempo T2 en el horizonte de planificación
param T3 ;     #Periodo de tiempo T3 en el horizonte de planificación

## PARAMETROS ##
param a {p in P,M[p],N[p]};
param C_prod {P, C,1..T};
param T_cult {C};
param dda {C,1..T,D};
param capacidad;
param c_plant {C};
param c_ndda {C};
param c_mov {link};
param vz {p in P,M[p]};
param vz_total {P};
param e {p in P,M[p]};

```

```

param alpha;
param Cota{P};
param Nn{P};
param rend {p in P,C,M[p]};
param alto_ne {C}, binary;
param medio_ne {C}, binary;

## VARIABLES DECISIÓN ##
var X {p in P, C, t in 1..T, M[p]}, binary;
var CT {P,t in 1..T,D}, >=0 integer;
var W {i in C, t in 1..T, d in D}, >=0;
var Y {p in P, C, t in 1..T, M[p]}, >=0;
var V {P, C, t in 1..T, D}, >=0 ;
var Z {C, t in 1..T, D}, >=0 ;
var L { p in P, C, t in 1..T, M[p]}, binary;

## FUNCIÓN OBJETIVO ##
minimize Total_costo_M2:
  (sum{t in 1..T}
   (sum{p in P,i in C,m in M[p]} ((c_plant[i]*e[p,m])*X[p,i,t,m])
    sum{(p,d) in link} (c_mov[p,d]*CT[p,t,d]) +
    sum{i in C, d in D}(c_ndda[i]*W[i,t,d]))));

## RESTRICCIONES ##
subject to r1 {p in P, i in C, t in 1..T, m in M[p]}:
  Y[p,i,t,m] = X[p,i,t,m]*(rend[p,i,m]);

subject to r2 {p in P, i in C, t in 1..T, m in M[p]}:
  X[p,i,t,m] <= C_prod[p,i,t];

subject to r3 {p in P, i in C, t in 1..T}:
  sum {m in M[p]} Y[p,i,t,m] >= sum {d in D} V[p,i,t,d];

subject to r4 {i in C, t in 1..T, d in D}:
  sum {p in P} V[p,i,t,d] = Z[i,t,d];

subject to r5 {p in P, i in C, t in 1..T, d in D}:
  Z[i,t,d] = dda[i,t,d] - W[i,t,d] ;

subject to r6 {p in P, i in C, t in 1..T, d in D}:
  V[p,i,t,d] <= capacidad*CT[p,t,d];

subject to r7 {p in P, t in 1..T, n in N[p]}:
  sum {m in M[p], i in C, k in 0..(T_cult[i]-1):t-k>0} a[p,m,n]*X[p,i,t-k,m] = 1;

subject to r8 {p in P, i in C, t in 1..T, m in M[p]}:
  sum { k in 0..(T_cult[i]-1):t-k>0} X[p,i,t-k,m]=L[p,i,t,m];

subject to r9a {p in P, m in M[p]}:
  sum {i in C, t in 1..T1} alto_ne[i]*L[p,i,t,m] <=3;

subject to r9b {p in P, m in M[p]}:
  sum {i in C, t in 2..T2} alto_ne[i]*L[p,i,t,m] <=3;

subject to r9c {p in P, m in M[p]}:
  sum {i in C, t in 3..T3} alto_ne[i]*L[p,i,t,m] <=3;

```

```

subject to r10a {p in P, m in M[p]}:
    sum {t in 1..T2} (sum {i in C} medio_ne[i]*L[p,i,t,m] + sum {j in C} alto_ne[j]*L[p,j,t,m]) <= 4;

subject to r10b {p in P, m in M[p]}:
    sum {t in 2..T3} (sum {i in C} medio_ne[i]*L[p,i,t,m] + sum {j in C} alto_ne[j]*L[p,j,t,m]) <= 4;

subject to r11 {p in P, m in M[p]}:
    sum {i in C, t in 2..T} X[p,i,t,m] <= (T-1)* sum {i in C} X[p,i,1,m];

subject to r12 {p in P, t in 1..T}:
    sum {m in M[p], i in C} (vz[p,m] + (1+alpha)*vz_total[p])*X[p,i,t,m] <= (1-alpha)*vz_total[p]*Nn[p];

subject to r13 {p in P, t in 1..T}:
    sum {m in M[p], i in C} X[p,i,t,m] <= Cota[p];

```

(Fuente: AMPL IDE .mod).

## Anexo D

**Figura 7.4.** Código en AMPL archivo.mod para un modelo de rotación de cultivos orgánicos en su enfoque jerárquico.

```

#SISTEMA DE PRODUCCIÓN: Orgánico
#ENFOQUE JERARQUICO: Plan óptimo de rotación de cultivos

## CONJUNTOS ##
set P; # Productores p=1..P
set C; # Cultivos i=1..C
param T; # Periodos [semanas] t=1..T
set M{P}; # zonas potenciales m=1..M[p], p=1..P
set D; # Centro de distribución
set link within (P cross D); # Arcos entre los nodos
param T1; #Periodo de tiempo T1 en el horizonte de planificación
param T2; #Periodo de tiempo T2 en el horizonte de planificación
param T3; #Periodo de tiempo T3 en el horizonte de planificación
set ady within (Mm cross Mm); #Pares de zonas adyacentes
set FC; #Conjunto de familias hortícolas j=1.FC
set F{FC}; # Subconjunto de cultivos de la familia hortícola j

## PARAMETROS ##
param a {p in P,M[p],N[p]};
param C_prod {P, C,1..T};
param T_cult {C};
param dda {C,1..T,D};
param capacidad;
param c_plant {C};
param c_ndda {C};
param c_mov {link};
param rend {p in P,C,M[p]};
param alto_ne {C}, binary;
param medio_ne {C}, binary;

```

```

## VARIABLES DECISIÓN ##
var X {p in P, C, t in 1..T, M[p]}, binary;
var CT {P,t in 1..T,D}, >=0 integer;
var W {i in C, t in 1..T, d in D}, >=0;
var Y {p in P, C, t in 1..T, M[p]}, >=0;
var V {P, C, t in 1..T, D}, >=0 ;
var Z {C, t in 1..T, D}, >=0 ;
var L { p in P, C, t in 1..T, M[p]}, binary;

## FUNCIÓN OBJETIVO ##
minimize Total_costo_M2:
  (sum{t in 1..T}
    (sum{p in P,i in C,m in M[p]} ((c_plant[i]*e[p,m])*X[p,i,t,m])
      sum{(p,d) in link} (c_mov[p,d]*CT[p,t,d]) +
      sum{i in C, d in D}(c_ndda[i]*W[i,t,d]))));

## RESTRICCIONES ##
subject to r1 {p in P, i in C, t in 1..T, m in M[p]}:
  Y[p,i,t,m] = X[p,i,t,m]*(rend[p,i,m]);

subject to r2 {p in P, i in C, t in 1..T, m in M[p]}:
  X[p,i,t,m] <= C_prod[p,i,t];

subject to r3 {p in P, i in C, t in 1..T}:
  sum {m in M[p]} Y[p,i,t,m] >= sum {d in D} V[p,i,t,d];

subject to r4 {i in C, t in 1..T, d in D}:
  sum {p in P} V[p,i,t,d] = Z[i,t,d];

subject to r5 {p in P, i in C, t in 1..T, d in D}:
  Z[i,t,d] = dda[i,t,d] - W[i,t,d] ;

subject to r6 {p in P, i in C, t in 1..T, d in D}:
  V[p,i,t,d] <= capacidad*CT[p,t,d];

subject to r7 {p in P, t in 1..T}:
  sum {m in M[p], i in C, k in 0..(T_cult[i]-1):t-k>0} X[p,i,t-k,m] = 1;

subject to r8 {p in P, i in C, t in 1..T, m in M[p]}:
  sum { k in 0..(T_cult[i]-1):t-k>0} X[p,i,t-k,m]=L[p,i,t,m];

subject to r9a {p in P, m in M[p]}:
  sum {i in C, t in 1..T1} alto_ne[i]*L[p,i,t,m] <=3;

subject to r9b {p in P, m in M[p]}:
  sum {i in C, t in 2..T2} alto_ne[i]*L[p,i,t,m] <=3;

subject to r9c {p in P, m in M[p]}:
  sum {i in C, t in 3..T3} alto_ne[i]*L[p,i,t,m] <=3;

subject to r10a {p in P, m in M[p]}:
  sum{t in 1..T2}(sum {i in C} medio_ne[i]*L[p,i,t,m]+ sum {j in C} alto_ne[j]*L[p,j,t,m]) <=4;

subject to r10b {p in P, m in M[p]}:
  sum {t in 2..T3}(sum {i in C} medio_ne[i]*L[p,i,t,m]+ sum {j in C} alto_ne[j]*L[p,j,t,m]) <=4;

subject to r11 {p in P, t in 1..T,(u,v) in ady, j in FC}:
  sum {i in F[j], k in 0..T_cult[i]:t-k>0} (X[p,i,t-k,u]+X[p,i,t-k,v])<=1;

subject to r12 {p in P, t in 1..T, m in M[p], j in FC}:
  sum {i in F[j], k in 0..T_cult[i]:t-k>0} X[p,i,t-k,m] <= 1;

```

(Fuente: AMPL IDE .mod).



## Anexo E

**Figura 7.5.** Código en AMPL archivo.mod para un modelo de delineación de zonas de manejo y plan de rotación de cultivos orgánicos en su enfoque integrado.

```

#SISTEMA DE PRODUCCIÓN: Orgánico
#ENFOQUE JERARQUICO: Elección optima de delimitación de zonas de
#                               y de un plan de rotación de cultivos.

## CONJUNTOS ##
set P;                               # Productores p=1..P
set C;                               # Cultivos i=1..C
param T;                             # Periodos [semanas] t=1..T
set M{P};                             # zonas potenciales m=1..M[p], p=1..P
set N{P};                             # Puntos muestrales
set D;                               # Centro de distribución
set link within (P cross D);# Arcos entre los nodos
param T1 ;                           # Periodo de tiempo T1 en el horizonte de planificación
param T2 ;                           # Periodo de tiempo T2 en el horizonte de planificación
param T3 ;                           #Periodo de tiempo T3 en el horizonte de planificación
set ady within (Mm cross Mm);# Pares de zonas adyacentes
set FC;                               # Conjunto de familias hortícolas j=1.FC
set F{FC};                            # Subconjunto de cultivos de la familia hortícola j

## PARAMETROS ##
param a {p in P,M[p],N[p]};
param C_prod {P, C,1..T};
param T_cult {C};
param dda {C,1..T,D};
param capacidad;
param c_plant {C};
param c_ndda {C};
param c_mov {link};
param vz {p in P,M[p]};
param vz_total {P};
param e {p in P,M[p]};
param alpha;
param Cota{P};
param Nn{P};
param rend {p in P,C,M[p]};
param alto_ne {C}, binary;
param medio_ne {C}, binary;

## VARIABLES DESECCIÓN ##
var X {p in P, C, t in 1..T, M[p]}, binary;
var CT {P,t in 1..T,D}, >=0 integer;
var W {i in C, t in 1..T, d in D}, >=0;
var Y {p in P, C, t in 1..T, M[p]}, >=0;
var V {P, C, t in 1..T, D}, >=0 ;
var Z {C, t in 1..T, D}, >=0 ;
var L { p in P, C, t in 1..T, M[p]}, binary;

## FUNCIÓN OBJETIVO ##
minimize Total_costo_M4:
  (sum{t in 1..T}
    (sum{p in P,i in C,m in M[p]} ((c_plant[i]*e[p,m])*X[p,i,t,m])
      sum{(p,d) in link} (c_mov[p,d]*CT[p,t,d]) +
        sum{i in C, d in D}(c_ndda[i]*W[i,t,d]))));

```

```

## RESTRICCIONES ##
subject to r1 {p in P, i in C, t in 1..T, m in M[p]}:
    Y[p,i,t,m] = X[p,i,t,m]*(rend[p,i,m]);

subject to r2 {p in P, i in C, t in 1..T, m in M[p]}:
    X[p,i,t,m] <= C_prod[p,i,t];

subject to r3 {p in P, i in C, t in 1..T}:
    sum {m in M[p]} Y[p,i,t,m] >= sum {d in D} V[p,i,t,d];

subject to r4 {i in C, t in 1..T, d in D}:
    sum {p in P} V[p,i,t,d] = Z[i,t,d];

subject to r5 {p in P, i in C, t in 1..T, d in D}:
    Z[i,t,d] = dda[i,t,d] - W[i,t,d] ;

subject to r6 {p in P, i in C, t in 1..T, d in D}:
    V[p,i,t,d] <= capacidad*CT[p,t,d];

subject to r7 {p in P, t in 1..T, n in N[p]}:
    sum {m in M[p], i in C, k in 0..(T_cult[i]-1):t-k>0} a[p,m,n]*X[p,i,t-k,m] = 1;

subject to r8 {p in P, i in C, t in 1..T, m in M[p]}:
    sum {k in 0..(T_cult[i]-1):t-k>0} X[p,i,t-k,m]=L[p,i,t,m];

subject to r9a {p in P, m in M[p]}:
    sum {i in C, t in 1..T1} alto_ne[i]*L[p,i,t,m] <=3;

subject to r9b {p in P, m in M[p]}:
    sum {i in C, t in 2..T2} alto_ne[i]*L[p,i,t,m] <=3;

subject to r9c {p in P, m in M[p]}:
    sum {i in C, t in 3..T3} alto_ne[i]*L[p,i,t,m] <=3;

subject to r10a {p in P, m in M[p]}:
    sum{t in 1..T2}(sum {i in C} medio_ne[i]*L[p,i,t,m]+ sum {j in C} alto_ne[j]*L[p,j,t,m]) <=4;

subject to r10b {p in P, m in M[p]}:
    sum {t in 2..T3}(sum {i in C} medio_ne[i]*L[p,i,t,m]+ sum {j in C} alto_ne[j]*L[p,j,t,m]) <=4;

subject to r11 {p in P, m in M[p]}:
    sum {i in C, t in 2..T} X[p,i,t,m] <= (T-1)* sum {i in C} X[p,i,1,m];

subject to r12 {p in P, t in 1..T}:
    sum {m in M[p], i in C} (vz[p,m] + (1+alpha)*vz_total[p])*X[p,i,t,m] <= (1-alpha)*vz_total[p]*Nn[p];

subject to r13 {p in P,t in 1..T}:
    sum {m in M[p], i in C} X[p,i,t,m] <= Cota[p];

subject to r14 {p in P, t in 1..T,(u,v) in ady, j in FC}:
    sum {i in F[j], k in 0..T_cult[i]:t-k>0} (X[p,i,t-k,u]+X[p,i,t-k,v])<=1;

subject to r15 {p in P, t in 1..T, m in M[p], j in FC}:
    sum {i in F[j], k in 0..T_cult[i]:t-k>0} X[p,i,t-k,m] <= 1;

```

(Fuente: AMPL IDE .mod).