



RED INTERNACIONAL
DE METODOLOGÍA
DE INVESTIGACIÓN DE
SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

Nº 3

SERIE
MATERIALES

**ARC HIV
100364**

PROGRAMACIÓN MULTICRITERIO: UN INSTRUMENTO PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

**MARIO MAINO M.
JULIO PITTET D.
CLAUS KÖBRICH G.**

Este informe se presenta tal como se recibió por el CIID de parte del o de los becarios del proyecto. No ha sido sometido a revisión por pares ni a otros procesos de evaluación.

Esta obra se usa con el permiso de Rimisp-Centro Latinoamericano para el Desarrollo Rural.

© 1993, Rimisp-Centro Latinoamericano para el Desarrollo Rural.

PROGRAMACIÓN MULTICRITERIO: UN INSTRUMENTO PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

DR. MARIO MAINO M.
DR. JULIO PITTET D.
DR. CLAUD KÖBRICH G.

*Los autores son Médicos Veterinarios
del Area de Sistemas de Producción y Economía Pecuaria,
en el Departamento de Fomento de la Producción Animal,
de la Facultad de Ciencias Veterinarias y Pecuarias
de la Universidad de Chile. Santiago.*



Santiago de Chile
1993

ARCHIV
631.95(8)
R 4
no. 3

RIMISP
Red Internacional de Metodología
de Investigación de Sistemas de Producción
Rosa O'Higgins 30 - Casilla 244 - Correo 34
Teléfonos 212 7072 - 246 6335
Fax 201 1415
Santiago de Chile

Indice

PRESENTACIÓN	7
INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO 1. Sistemas Agropecuarios	13
CAPÍTULO 2. Tendencias que Buscan la Aplicación Práctica de la Teoría General de Sistemas	17
CAPÍTULO 3. La Programación Matemática en un Contexto de Objetivos Múltiples	21
3.1 Técnicas que requieren "a priori" una definición de las preferencias en relación con los objetivos, por parte del centro decisor	25
3.1.1 Programación por Metas	25
3.1.2 Método de Haimes-Hall	30
3.1.3 La Programación Compromiso	31
3.2 Técnicas que requieren una definición progresiva de las preferencias en relación con los objetivos, por parte del centro decisor	32
3.2.1 Método STEP	34
3.2.2 Método Geoffrion	35
3.2.3 Método Zionts Wallenius	35
3.2.4 Método SEMOPS	36
3.2.5 Método del Valor de las Sustituciones	37
3.2.6 Método Roy	37
3.2.7 Método de Vincle	38
3.2.8 Método de Vanderpooten	38
3.3 Técnicas que requieren "a posteriori" una definición de las preferencias por parte del centro decisor	39
3.3.1 Programación Multiobjetivo	39
3.3.2 Generación del conjunto eficiente	39
3.3.3 Ventajas y desventajas de cada enfoque para obtener el conjunto de soluciones eficientes	41
3.4 Ventajas y desventajas de las distintas técnicas de programación multicriterio	42

CAPÍTULO 4: Aplicaciones a problemas de diseño de sistemas de producción campesinos	45
4.1 Primera aplicación: Programación Multiobjetivo (Rivas, 1990)	47
4.2 Segunda aplicación: Modelo Interactivo STEP (Binelli, 1991)	59
4.3 Tercera aplicación: Programación Compromiso (Rojas, 1991)	78
4.4 Conclusiones generales de las aplicaciones	86
CAPÍTULO 5: Bibliografía	87
CAPÍTULO 6: Anexo	95

Presentación

El trabajo que se presenta en esta ocasión, documenta uno de los métodos analíticos que RIMISP -a través de las instituciones e investigadores asociados a la Red- ha venido probando en distintos países y proyectos latinoamericanos en los últimos cuatro años.

El trabajo de RIMISP con el método de la programación multicriterio, se inició para probar su utilidad en investigaciones relacionadas al tema de los criterios y procesos decisionales de los campesinos. Las primeras presentaciones y discusiones de trabajos científicos en esta perspectiva se llevaron a efecto en nuestro IV Encuentro Internacional, en Ecuador, a inicios de 1991.

Al poco andar, vislumbramos en la Red la posibilidad de asociar este instrumento de análisis a la discusión sobre la fase de diseño o planificación en proyectos de investigación de sistemas de producción. Las primeras revisiones críticas de un número importante de proyectos, nos indicaban que, en muchos casos, la enorme masa de información generada en la etapa de diagnóstico por un proyecto de sistemas de producción, habitualmente no era adecuadamente empleada para planificar y diseñar las estrategias de desarrollo tecnológico y los objetivos específicos de innovación que serían perseguidos por el proyecto.

Paradójicamente, en una metodología que se precia de holística, como es el enfoque de sistemas, constatábamos que con frecuencia se producía una fuerte reducción y un verdadero cuello de botella entre la etapa de diagnóstico y la de ensayos a nivel de finca. La debilidad de la etapa de diseño, que articula el diagnóstico con la acción de investigación en fincas, fue identificada como una de las causas principales de los fracasos totales o relativos de numerosos proyectos.

Entre otras preguntas que muchas veces no eran adecuadamente

respondidas al analizar los datos del diagnóstico, nos preocupaba la evaluación ex-ante del efecto de innovaciones específicas a nivel de la finca en su conjunto. Es decir, normalmente se llegaba sólo hasta el punto de comparar dos tecnologías o dos alternativas entre sí, desde el punto de vista de variables económicas (por ejemplo, margen bruto a través de presupuestos parciales) y agronómicas o zootécnicas (por ejemplo, diferencial de producción o de rendimientos).

Sin embargo, las ventajas del enfoque de sistemas se dejaban a un lado al no analizar con suficiente detención la relación entre una innovación X y las restricciones de la finca en su conjunto, así como también en comparación con los objetivos globales del productor (y no solo los del rubro o actividad).

Entre otros métodos que pusimos a prueba para intentar llenar estos vacíos, la programación multiobjetivo demostró un conjunto de ventajas que son ilustradas en las distintas aplicaciones prácticas que se incluyen en el texto que ahora presentamos.

Como siempre sucede, el método también tiene desventajas, como son aquellas asociadas en general a la programación lineal y que han sido tratadas ampliamente en la literatura especializada y, muy especialmente, el peligro de que el practicante del método no sepa resistir la tentación de usar los resultados de la programación multicriterio con fines normativos y no solamente indicativos, como recomiendan con justicia los autores.

A juzgar por los resultados obtenidos en las ya varias aplicaciones prácticas a cargo de miembros de RIMISP, creemos que la programación multicriterio puede ser una herramienta poderosa y relativamente sencilla para elevar la capacidad de los equipos de terreno al analizar ex-ante el sentido y los efectos de las distintas opciones de intervención del sistema de producción. De esta forma, se amplía el arsenal de métodos analíticos que, junto a otras opciones, deberán permitir que la etapa de diseño en el enfoque de sistemas de producción recupere el espacio privilegiado que es necesario para aumentar las probabilidades de éxito de los proyectos de investigación, extensión y desarrollo rural.

Julio A. Berdegúe
Coordinador de RIMISP

Santiago, enero de 1993

1. Introducción

El enfoque científico predominante hasta la aparición de la Teoría de Sistemas fue el reduccionismo, que sostenía que todo lo existente podía descomponerse en elementos simples e individuales.

De acuerdo al enfoque reduccionista, el primer paso del análisis científico consistía en aislar el objeto de investigación, descomponiéndolo en partes individuales y, preferentemente, independientes. En segundo lugar, se procedía a explicar el comportamiento de cada una de las partes. Por último, se agregaban las explicaciones de las partes para llegar a comprender el conjunto. Es decir, la comprensión del objeto de conocimiento como un todo se conseguía sumando o agregando la comprensión de sus partes.

A comienzos del siglo XX, esta tendencia de la ciencia se vio modificada. Los esfuerzos ya no se centraron en aislar los fenómenos, sino en establecer y analizar las interacciones entre los mismos, examinando segmentos cada vez más amplios de la naturaleza.

Los orígenes de tal cambio de tendencia se deben a Von Bertalanffy, quien, a finales de los años 20, propuso el abandono del enfoque reduccionista o analítico hasta entonces predominante. Dentro del campo de la biología, el citado autor rompió con la concepción clásica del organismo e introdujo lo que denominó "concepto organísmico". En el mismo, se contiene la idea de que el organismo ha de ser investigado como un todo, ya que constituye un sistema compuesto por múltiples elementos que interactúan de forma dinámica. Esto, en términos simples, implica sostener que el todo es distinto a las partes y más que la suma de las mismas.

Si aceptamos esta idea, es imposible comprender la conducta del todo examinando sus partes por separado. En esta concepción se encuentra el germen de la Teoría de Sistemas. Su generalización la esboza Von Bertalanffy poco antes de la Segunda Guerra Mundial, aunque no comienza su auténtico desarrollo hasta la creación de la Society for General Systems Research (1954). Los esfuerzos de esta Sociedad se ven apoyados por el entonces naciente reconocimiento de la utilidad de los métodos cuantitativos para el desarrollo de las ciencias.

Este nuevo concepto de la ciencia ha invadido paulatinamente las distintas áreas del conocimiento. Su orientación inicial hacia las ciencias naturales, se extendió posteriormente al campo de las ciencias sociales y técnicas. Dentro del tema de la Economía de la Empresa, en particular, los primeros pasos comenzaron a darse en la década de los sesentas, cuando en la Universidad de Saint Gallen (Suiza), surgió un grupo pionero que en 1964 se propuso la tarea de reestructurar el concepto de economía de la empresa a partir del enfoque sistémico.

En definitiva, el enfoque sistémico se presentó como un nuevo paradigma, dirigido a integrar y relacionar las distintas escuelas del conocimiento ante una situación crítica de la ciencia, que luchaba entre lo general y lo particular, entre lo positivo y lo normativo, entre lo abstracto y lo concreto. Con su aplicación, se buscan como referencia los distintos elementos que componen el objeto de estudio, identificando además, su organización e interacción dinámica. Sobre la base de estos conocimientos, se pretende predecir el comportamiento de la realidad estudiada. Esta última, se enmarca en el concepto de sistema, el cual podrá ser definido de muy variadas formas, según los objetivos que se persigan en la investigación.

CAPÍTULO 1

Sistemas Agropecuarios

El fracaso de gran cantidad de proyectos de desarrollo agrario en el Tercer Mundo, se ha debido al desconocimiento de sus autores de las realidades agrarias. Uno de los principales errores cometidos consiste en idear soluciones técnicas sin tomar en cuenta la complejidad de los sistemas de producción utilizados en el marco de las explotaciones agrícolas (Dufumier, 1985). Un desarrollo agrícola que apunte a restaurar los equilibrios alimentarios y ecológicos, exige un profundo conocimiento de la producción agropecuaria (Mazoyer, 1988).

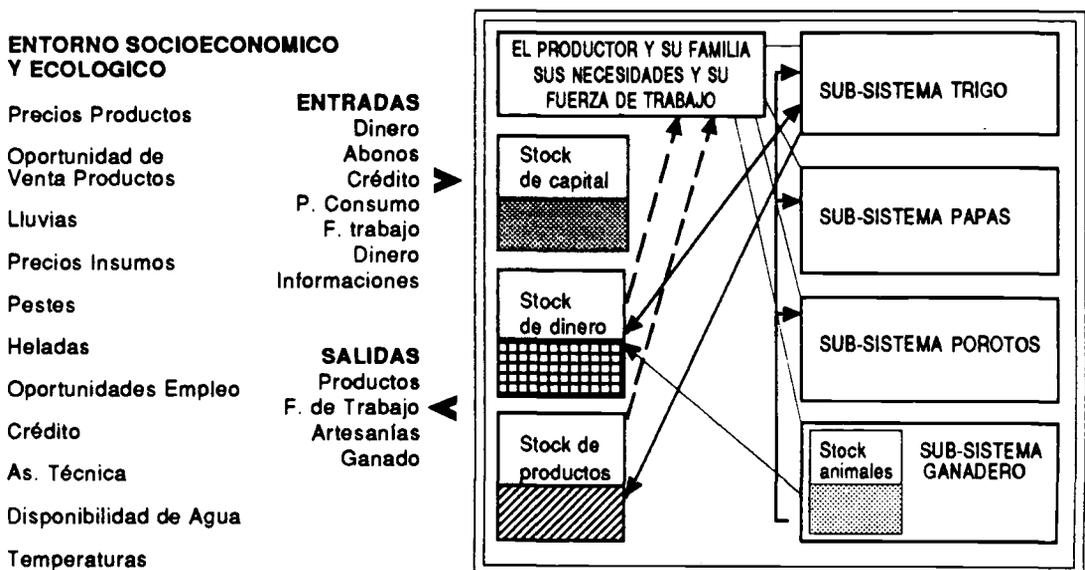
En la realidad agropecuaria el enfoque sistémico presenta importantes ventajas para resolver los tradicionales errores de enfoque, ya que toma en consideración las interacciones entre los diferentes subsistemas en el tiempo y el espacio, luego del análisis de funcionamiento de una explotación o un conjunto de explotaciones (Installé, 1988).

Según Norman (1980), un sistema agropecuario es el resultado de la interacción compleja de muchos componentes mutuamente dependientes. En el centro de este proceso se encuentra el productor. Pero además, la producción del predio y las decisiones del grupo familiar están estrechamente ligadas, por lo cual deben ser analizadas en la investigación de sistemas.

Los sistemas de producción empleados no se conciben sólo en función de las potencialidades y de las restricciones agroecológicas de las regiones involucradas, sino que responden también a razones socio-económicas. No considerar este hecho, representaría excluir del análisis los problemas políticos, sociales y económicos que presentan los sistemas agropecuarios (Boucher, 1985).

El funcionamiento del predio campesino también debe entenderse como un sistema complejo, compuesto por el grupo familiar, el predio y sus recursos, en permanente interacción con su entorno socio-económico y ecológico en función de sus objetivos (Valenzuela y González, 1987). Ver Figura 1.

FIGURA 1. PRESENTACIÓN DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN



Berdegú et al. (1988), señalan que las unidades campesinas productivas son posibles de analizar bajo un enfoque de sistemas, debido a que:

- i) tienen objetivos como unidad (objetivos sistémicos).
- ii) forman parte de una jerarquía de sistemas: están insertos en un suprasistema ecohistórico y están compuestos por subsistemas. Existen circuitos de flujo de materia y energía, de información y de dinero, entre cada uno de estos niveles jerárquicos.
- iii) tienen estructura y funcionamiento. Es decir, procesan en forma organizada distintos niveles de materia y energía, de información y dinero.
- iv) tienen permanencia en el tiempo.

El enfoque de sistemas, cuenta con un sólido fundamento científico y recoge una vasta experiencia en muchos países del tercer mundo, constituye una alternativa eficaz para cumplir los objetivos y es apropiado a las condiciones del campesinado y de su producción^{1/}. (Berdegú y Larraín, 1987).

1/ Este enfoque aplicado al problema de la agricultura es conocido como Investigación y Desarrollo de Sistemas de Producción, en la denominación de la escuela Anglófona (Farming Systems Research and Development) o como Investigación - Desarrollo en la denominación de la escuela Francófona (Recherche - Développement).

CAPÍTULO 2

Tendencias que Buscan la Aplicación Práctica de la Teoría General de Sistemas

A partir de la teoría general de sistemas han surgido varias tendencias que buscan su aplicación práctica a través de las ciencias aplicadas. Entre otras se puede nombrar la cibernética, la teoría de los juegos, el análisis factorial, y la investigación de operaciones y análisis de sistemas.

La Investigación Operativa (I.O.) se puede definir, como la aplicación del método científico al estudio y solución de problemas que aparecen en la planificación, diseño, administración y operación de sistemas complejos, principalmente organizaciones o sistemas sociales, tales como empresas e instituciones.

Según Wagner (1970), las características que distinguen a la I.O. son:

- i) Su énfasis en la toma de decisiones. Los resultados de un estudio de I.O. deben tener implicancia directa en la solución de un determinado problema práctico.
- ii) Una evaluación de las decisiones basada en criterios económicos de eficiencia. Así, en organizaciones agroindustriales, por ejemplo, estas valoraciones incluyen costos variables, ingresos, flujos de caja, índice de retorno de inversiones, etc.. La solución debe balancear óptimamente los factores conflictivos relacionados a tales valoraciones.
- iii) El uso de modelos formales. Una aplicación de I.O. implica, normalmente, la construcción de modelos matemáticos.

De las características anteriores tal vez la que mejor tipifica a la I.O., es esta última, también llamada **Modelamiento**, la cual se podría decir que constituye la esencia del enfoque de I.O.

Inicialmente, la I.O. se aplicó con mayor énfasis a problemas que ocurren dentro de una empresa o institución, y en decisiones operativas. Actualmente, se aplica en grandes sistemas donde juegan un papel igualmente importante los componentes físicos y los componentes humanos. Su objetivo consiste en tratar de diseñar, estructurar y operar tales sistemas en la mejor forma posible. Este último tipo de actividades de I.O. también recibe el nombre de Análisis de Sistemas.

Actualmente es muy difícil distinguir entre I.O. y las diferentes variedades existentes de Análisis de Sistemas; incluso, si uno mira las definiciones y objetivos asociados a ellas no se encuentran diferencias apreciables. Así por ejemplo, cuando se define el Análisis de Sistemas diciendo que es "el estudio cuantitativo de las posibles maneras de cumplir ciertos objetivos o usar ciertos recursos disponibles", podría estar definiéndose perfectamente a la I.O. (Barros, 1973).

Por otra parte, desde un punto de vista metodológico, tanto la I.O. como el Análisis de Sistemas, basan su estrategia de solución de problemas en el método científico, dando gran importancia a la construcción de un modelo y a la cuantificación del sistema bajo estudio.

Ahora bien, la mayoría de los modelos cuantitativos que se emplean para la toma de decisiones tienen, en general, dos limitaciones importantes. La primera, se refiere a la dificultad de correspondencia biunívoca entre el sistema formal propuesto y el real, y la segunda, al hecho de no poder considerar más que un sólo criterio como elemento base de la decisión. (Villalba, 1974 y Calatrava, 1980).

El esfuerzo por disminuir tales limitaciones, particularmente en el campo de los modelos de optimización, ha traído consigo el desarrollo de una serie de técnicas. Así por ejemplo, han nacido la programación dinámica, la programación estocástica, la programación no lineal, etc.

La programación dinámica permite reflejar en distintos momentos del tiempo los posibles estados del sistema que se está modelizando y, a su vez, determina la trayectoria óptima que éste ha de seguir bajo diferentes hipótesis. Al mismo tiempo, cuando alguno de los coeficientes de la función objetivo y/o de las restricciones no son fijos, sino variables aleatorias que siguen una determinada distribución probabilística, se recurre a la programación estocástica. Por último, muchas veces las relaciones lineales asumidas pueden producir un modelo irreal. Este hecho puede ser resuelto a través de la programación no lineal, en donde, la programación cuadrática es una de las que más se ha aplicado.

A la luz de estos ejemplos podemos ver como, en respuesta a la necesidad de buscar mayor similitud entre el modelo y la realidad, se han creado nuevas técnicas, algunas de las cuales aún se encuentran en estado embrionario.

Sin embargo, persiste el problema que significa la imposibilidad de incorporar más de un objetivo como elemento base para la decisión, por lo que al ser aplicada la programación matemática clásica, obliga a los centros decisores a elegir un objetivo único, que será el que se procederá a optimizar. Esto indudablemente crea una rigidez significativa al tratar problemas concretos de la vida real.

Es importante destacar que no se están considerando situaciones en las que existe perfecta compatibilidad entre varios objetivos perseguidos por el centro decisor, en cuyo caso el problema planteado resulta trivial, ya que para conseguir todos los objetivos no es necesaria ninguna elección entre los mismos. (Valero, 1977)

CAPÍTULO 3
La Programación Matemática
en un Contexto
de Objetivos Múltiples

En el campo de la programación matemática existen distintos enfoques paradigmáticos para analizar el problema de la toma de decisiones en el contexto de objetivos múltiples^{2/} Dichos bloques pueden clasificarse en tres grandes grupos, de acuerdo con el momento en el que se requiere la definición de las preferencias por parte del centro decisor, sobre determinados niveles de logro de los distintos objetivos^{3/} (Cohon, 1978; Hwang y Masud, 1979 y Duckstein, 1984).

a) *Técnicas que requieren "a priori" una definición de las preferencias por parte del centro decisor.*

- Programación por metas
- Método de Haime-Hall
- Programación compromiso

b) *Técnicas que requieren una definición progresiva de las preferencias por parte del centro decisor.*

- Método STEP
- Método Zionts-Wallenius
- Método Geoffrion
- Método SEMOPS
- Método del Valor de las Sustituciones
- Método de Roy
- Metodo de Vincke
- Método de Vanderpooten

c) *Técnicas que requieren "a posteriori" una definición progresiva de las preferencias por parte del centro decisor.*

- Programación multiobjetivo

Antes de entrar a detallar los distintos enfoques de la programación multicriterio se hace necesario para su mejor comprensión, conocer previamente algunos conceptos básicos, a saber:

- **Atributos:** Son valores del centro decisor relacionados con una realidad determinada. Esos valores son medibles y pueden ser expresados por funciones matemáticas $f(x)$ de las variables de decisión. El margen bruto, el riesgo, etc. son ejemplos de atributos.
- **Objetivo:** Dirección del cambio de un atributo. Es decir, los objetivos representan la maximización o la minimización de las funciones matemáticas que representan los atributos. Así maximizar el margen bruto, minimizar el riesgo, etc. son ejemplos de objetivos.
- **Nivel de aspiración:** Se define como el nivel aceptable de logro para un atributo.
- **Meta:** Es la combinación de un atributo con un nivel de aspiración. Así "generar un

2/ En este Capítulo se presentan con detalle los distintos enfoques de la programación multicriterio, por lo que recomendamos al lector que no esté interesado en conocer sus aspectos matemáticos, leer el Anexo 1 y luego las aplicaciones desarrolladas en el Capítulo 4.

3/ Se utiliza la tipología presentada por Rehman y Romero (1984a). Lo que Cohon (1978) y Hwang y Masud (1979) llaman técnicas, Rehman y Romero las incluyen sólo como distintos enfoques para generar soluciones eficientes de una técnica global, que llaman programación multiobjetivo.

margen bruto de \$1 millón" constituye un ejemplo típico de meta. En general las metas toman la forma $f(x) \leq b$, donde b representa el nivel de aspiración.

- **Restricción:** Tienen la misma estructura matemática y la misma apariencia formal que las metas. Sin embargo se diferencian en el significado que se le asigna al segundo miembro de ambas inecuaciones. Es así como en las metas el segundo miembro corresponde a un nivel de aspiración que el centro decisor desea alcanzar, pudiendo o no lograr este propósito. En el caso de las restricciones, el segundo miembro debe satisfacerse para poder tener una solución posible. Es decir, las metas permiten ciertas violaciones de las inecuaciones, situación que no es posible en el dominio de las restricciones.

- **Criterios:** Este término comprende tres de los conceptos anteriormente definidos. Así, criterios son los atributos, objetivos o metas de un centro decisor, que son relevantes para un problema de toma de decisión.

- **Óptimos de Pareto:** El concepto de Pareto óptimo juega un papel muy importante en la teoría económica tradicional, así como en los distintos enfoques de la teoría de la decisión multicriterio. En este sentido todos estos enfoques buscan las soluciones eficientes o Pareto óptimas. Por esta razón, es esencial definir este concepto.

El conjunto eficiente está formado por soluciones posibles (esto es, que cumplen las restricciones) tales, que para cada solución no perteneciente al conjunto eficiente (pero dentro del dominio de lo posible) existe una solución Pareto óptima para la que todas las funciones objetivos pueden alcanzar el mismo o mejor resultado, siendo necesariamente mejor para al menos un objetivo. (Romero y Rehman, 1984a).

A modo de ejemplo, imaginemos que en un problema de planificación agropecuaria el centro decisor tiene tres objetivos: maximizar el margen bruto (MB), maximizar el empleo de mano de obra (MO) y minimizar el endeudamiento (ED), existiendo las siguientes soluciones posibles:

Solución	MB ^{1'}	MO ^{2'}	ED ^{1'}	
A	300	150	90	Eficiente
B	200	150	90	No eficiente
C	200	170	100	Eficiente

^{1'}: unidades monetarias (u.m.)

^{2'}: horas hombre

De acuerdo con la definición de eficiencia, se puede apreciar que la solución B no es eficiente, ya que está dominada por la solución A. En efecto y aunque tanto para el caso del empleo como para el del endeudamiento ambas soluciones coinciden, el margen bruto dado por la solución A es mayor que el dado por la solución B. Con esto, la solución B nunca será elegida por un centro decisor racional. Por el contrario, la solución C es eficiente pues no está dominada por la A, ya que a pesar de que en términos de margen bruto y endeudamiento es peor, en términos del empleo generado es mejor.

• **Intercambios (Trade-off):** El concepto de soluciones eficientes o Pareto óptimas, nos conduce a otro concepto muy importante en la teoría de la decisión multicriterio: el valor de los intercambios entre dos objetivos. El intercambio entre dos objetivos, mide lo que se sacrifica de un objetivo, frente a una mejora unitaria del otro.

Así, si se tienen dos soluciones eficientes X^1 y X^2 , el intercambio entre el j -ésimo y el k -ésimo criterio viene dado por:

$$T_{jk} = \frac{f_j(X^1) - f_j(X^2)}{f_k(X^1) - f_k(X^2)}$$

donde: $f_j(X^1)$ y $f_k(X^2)$ representan las dos funciones objetivos consideradas.

Siguiendo con nuestro ejemplo, el valor del intercambio entre margen bruto y endeudamiento para las soluciones A y C es:

$$T_{AC} = \frac{300 - 200}{100 - 90} = 10$$

El intercambio indica que cada unidad que disminuye el endeudamiento implica una disminución de 10 u.m. en el margen bruto. En otras palabras, el costo de oportunidad de una unidad de endeudamiento es 10 u.m. de margen bruto.

3.1 TÉCNICAS QUE REQUIEREN "A PRIORI" UNA DEFINICIÓN DE LAS PREFERENCIAS EN RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS, POR PARTE DEL CENTRO DECISOR

3.1.1 Programación por Metas

La programación por metas constituye, quizás, la primera aproximación a la toma de decisión en un contexto de objetivos múltiples, efectuada a través de la programación matemática.

Existe consenso entre los investigadores en considerar el trabajo de Charnes y Cooper (1961) como el primero en que se presentó un modelo en el cual figura, de manera explícita, una función con más de un objetivo a optimizar^{4/}.

Dicho modelo permite abordar el problema que significa la existencia de una serie de objetivos en conflicto, los cuales son incluidos como restricciones. Dado que en la mayor parte de los casos resulta imposible satisfacer todos los objetivos, la función objetivo del modelo consiste en la minimización de las desviaciones, positivas o negativas, que hay entre el nivel de logro de cada una de las metas y su correspondiente nivel de aspiración.

4/ En 1958 C. Klahr publicó un trabajo que abordó el problema de la existencia de más de un objetivo. Sin embargo, no propuso claramente un modelo operativo.

i) Estructura formal de un modelo de programación por metas^{5/}

El primer paso para formular un modelo de este tipo consiste en establecer el conjunto G de objetivos que se desea optimizar, que vendrá dado por:

$$G = g_1, g_2, g_i, \dots, g_n$$

Establecido el conjunto de objetivos G, se procede luego a determinar para cada uno de ellos un nivel deseado de realización (al hacer esto, se está pasando del concepto de objetivo al de metas), indicando si se desea que se satisfaga por exceso o bien por defecto. Los niveles de realización se representan por:

$$B = b_1, b_2, b_i, \dots, b_n$$

Luego se introducen en el modelo las variables de desviación. Estas pueden ser negativas (se representan por n_i) o positivas (se representan por p_i). Las variables de desviación n_i representan la cuantificación de la falta de logro en la meta i -ésima con respecto al nivel de aspiración deseado. Por otro lado, las variables de desviación p_i representan la cantidad en que se ha superado la meta i -ésima en relación al nivel indicado. En general, la meta i -ésima expresada de forma algebraica será:

$$g_i: f_i(x_1 + x_2 + x_i + \dots + x_n) + n_i - p_i = b_i$$

Es importante destacar que para cada una de las metas al menos una de las variables de desviación ha de ser nula. Así, por ejemplo, cuando se trata de una meta que se cumple exactamente, n_i y p_i serán iguales a cero. Si estamos frente a una meta que se satisface por exceso, n_i será igual a cero, y, en el caso de que la meta se satisfaga por defecto, p_i será igual a cero.

Una vez establecidos los objetivos y los niveles deseados de realización para cada uno de ellos (metas), se procede a identificar las variables de desviación que hay que minimizar. Esto se realiza de acuerdo con las siguientes pautas (Ignizio, 1976):

Meta	Procedimiento
a) igual o mayor que b_i	Minimiza n_i
b) igual o menor que b_i	Minimiza p_i
c) igual a b_i	Minimiza $n_i + p_i$

En el paso siguiente, que corresponde al establecimiento de la función objetivo, es donde se producen las diferencias fundamentales entre las dos variantes de esta técnica, que son la programación por metas ponderadas y la programación por metas lexicográficas.

En la primera, todas las metas son incluidas simultáneamente en una función objetivo agregada (función de logro), que minimiza la suma de todas las desviaciones existentes entre

5/ La metodología para estructurar un modelo de programación por metas expuestas aquí, coincide, aunque con ligeras modificaciones, a lo propuesto por Romero (1981).

las metas y sus niveles de aspiración. Las desviaciones se ponderan de acuerdo con la importancia relativa que cada una de las metas tiene para el centro decisor. Este es el enfoque que prioriza el trabajo de Charnes y Cooper (1961).

La programación por metas lexicográficas^{6/} requiere que se determinen previamente las prioridades, asociando a cada objetivo o grupo de objetivos un nivel de prioridad Q_k excluyente, de tal manera que si una prioridad Q_i es preferida a otra prioridad Q_j , lo seguirá siendo independiente de que se asocie a la prioridad Q_j cualquier multiplicador por grande que éste sea. Es decir, esta variante exige que el decisor sea capaz de particionar el conjunto de sus metas en distintas prioridades, asignando pesos excluyentes a las metas situadas en diferentes prioridades.

Definidas las prioridades se procede a construir la función de logro (función objetivo), que es un vector ordenado cuya dimensión coincide con el número de niveles de prioridad establecidos. Los componentes de dicho vector representan las variables de desviación que hay que proceder a minimizar para conseguir que los objetivos clasificados dentro de esa prioridad se aproximen lo más posible a los niveles de aspiración.

Para visualizar mejor tanto las características formales como las diferencias entre las dos variantes, en el Cuadro 1 se muestra de forma resumida la estructura de un modelo de programación por metas. Se puede observar que la diferencia entre ambas variantes es dada por el planteamiento empleado en el proceso de minimización.

CUADRO 1. ESTRUCTURA DE UN MODELO DE PROGRAMACIÓN POR METAS

	Programación por metas ponderadas	Programación por metas lexicográficas
Función de logro ^{1/}	$\text{Min } Z = (W_1 n_1 + W_2 n_2 + W_3 n_3)$	$\text{Min } Z = (n_1), (n_2 + n_3)$
Metas ^{1/}	m $\sum_{j=1}^m m_j x_j + n_1 - p_1 = M$ m $\sum_{j=1}^m v_j x_j + n_2 - p_2 = V$ m $\sum_{j=1}^m w_j x_j + n_3 - p_3 = W$	
Restriciones	m $\sum_{j=1}^m a_{ij} x_j \leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, n$ $x_j, n, p \geq 0$	

^{1/}: Se supone que las metas son tres y todas de tipo "igual o mayor que", razón por la cual las desviaciones a minimizar son las negativas.

^{6/} La programación por metas lexicográficas también fue introducida por Charnes y Cooper (1961), aunque de manera menos detallada. Posteriormente fue enriquecida, tanto en sus aspectos teóricos como prácticos, por Ijiri (1965) e Ignizio (1976).

donde: n_i = variables de desviación negativa de cada una de las tres metas.
 p_i = variables de desviación positiva de cada una de las tres metas.
 w_i = ponderación dada a cada unidad de desviación negativa.
 x_j = variables de decisión.

M, V y W constituyen los valores de los niveles de aspiración para cada uno de los tres objetivos (metas).

En el caso de la programación por metas lexicográficas, el centro decisor definió dos prioridades: la primera incluye la primera meta y el logro de ésta es inconmensurablemente preferido al logro de las metas incluidas en la segunda prioridad. Si quisiéramos asimilar a este caso las ideas contenidas en la programación por metas ponderadas, tendríamos que decir que la primera meta está ponderada por infinito con respecto a las de la segunda prioridad.

ii) Algoritmos de resolución

Los modelos de programación lineal por metas ponderadas se pueden resolver por aplicación directa del algoritmo clásico del simplex de la programación lineal. Sin embargo, este método no se puede usar en la programación por metas lexicográficas, aunque sean de tipo lineal, porque la función objetivo se formula de acuerdo con una estructura de prioridades excluyentes.

El primer algoritmo que se utilizó para resolver modelos de programación por metas fue el método secuencial lineal, que consiste básicamente en resolver una secuencia iterativa de problemas de programación lineal clásica. El primer programa lineal de la secuencia tiene por función objetivo la minimización de la primera componente del vector de logro, sujeta a las restricciones (igualdades) correspondientes a la prioridad Q_1 . Una vez resuelto el programa, se obtiene un primer conjunto de valores para las variables de decisión, así como también los valores de las variables de desviación correspondientes a la prioridad Q_1 .

El segundo programa lineal de la secuencia tiene por función objetivo la minimización de la segunda componente del vector de logro, sujeta a las restricciones correspondientes a la prioridad Q_1 y Q_2 , así como a los valores de las variables de desviación de la prioridad Q_1 obtenidos en la secuencia anterior.

El procedimiento iterativo se continúa hasta formular el programa lineal cuya función objetivo consiste en minimizar la última componente del vector de logro, sujeta a las restricciones correspondientes a todas las prioridades, así como a los valores de las variables de desviación obtenidas a través del proceso iterativo. La resolución del último programa nos proporciona la solución óptima del modelo de programación por metas lexicográficas. (Cefía y Romero, 1982)

Al respecto Romero y Rehman (1984a) en un trabajo que pretende determinar la combinación óptima para un huerto de frutales de una región de España, presentan este método secuencial de forma muy sencilla y clara, al dar para cada iteración las restricciones y la función objetivo correspondiente. Por otra parte, Dauer y Krueger (1977) presentan este método, priorizando los aspectos teóricos del mismo, así como su extensión a problemas diferentes de los lineales, para lo cual se requiere usar la correspondiente técnica de aproximación de una manera iterativa. En esta línea, Ignizio (1982) resuelve por este método, un modelo en el que muestra de una forma muy sencilla su parte operativa.

Del análisis del método anteriormente expuesto, se desprende que a pesar de ser muy sencillo de aprender y tener además la posibilidad concreta de disponer de programas de computador para resolverlo, presenta un inconveniente operativo ya que su aplicación requiere una gran cantidad de cálculos.

Estas dificultades del método secuencial llevaron a algunos autores a desarrollar métodos alternativos. Es así como nacieron algunas variantes del algoritmo del simplex, que se recogen en la literatura con el nombre de método simplex modificado o simplex multifase. El trabajo pionero en esta línea es el de Lee (1972), que presentó un programa en lenguaje FORTRAN que permite resolver los modelos de programación por metas lexicográficas de una sola vez. En esta línea, también puede incluirse el programa presentado por Ignizio (1976). En general, se puede decir que este algoritmo representa un significativo avance en relación al método secuencial, puesto que, entre otras cosas, elimina la necesidad de construir nuevas restricciones en cada secuencia.

Al finalizar la década de los setenta, Arthur y Ravindran (1978) propusieron un algoritmo más eficiente y codificado en FORTRAN. Este consiste en resolver un conjunto de subproblemas de programación lineal, usando la solución del problema de mayor prioridad como solución inicial del problema con prioridad inferior. El algoritmo presentado por estos autores permite lograr ahorros considerables en el tiempo de computador requerido por la aplicación del método simplex modificado desarrollado por Lee el año 1972 (entre un 12 y un 60% menos).

iii) Extensiones de la programación por metas

La voluntad de los investigadores por ir superando las rigideces derivadas de la programación por metas simple, ha permitido el desarrollo de interesantes variantes y extensiones metodológicas de la misma. Fue así como Contini (1968) comenzó a explorar la programación por metas en un contexto estocástico, planteando un modelo cuya función objetivo consistió en maximizar la probabilidad de que la solución caiga en un intervalo de confianza de un tamaño predeterminado.

Ignizio, en 1976, analizó por primera vez el problema de la programación lineal por metas con variables enteras, así como el problema de la programación no lineal. En ese trabajo se describen también los modelos de programación por metas enteras binarias, entendidos como una subclase especial de la programación por metas lineales entera. El año 1982, el mismo autor presentó aplicaciones de la programación por metas borrosas y de la programación por metas intervalar.

Un amplio trabajo sobre la programación por metas, en que se recogen aproximadamente trescientos artículos, es el de Romero (1986). En esta publicación se presentan algunas otras extensiones, como son la programación por metas fraccionales y por metas multinivel, además de las principales aplicaciones de esta técnica y sus extensiones.

Por último, Kvanli (1980) introdujo la idea de incluir funciones de penalización en la programación por metas. Esto consiste en establecer un sistema escalonado de pesos que castigue la falta de logro de las distintas metas (la penalización puede aplicarse a todas o a algunas de las metas del modelo). Esta variante de la programación por metas fue perfeccionada por Romero (1984), por cuanto la estructura original producía una sobrestimación de la penalización.

3.1.2 Método de Haimes-Hall

Este método, que fue propuesto por Haimes y Hall en 1974 se basa en la incorporación como criterio de decisión de los niveles de los objetivos, de los intercambios y de las tasas marginales de sustitución.

En general, este es el método que menos consenso concita a la hora de ser incorporado en algunas de las categorías de clasificación. Mientras Cohon (1978) y Goicoechea et al. (1982), lo incluyen en este grupo, Hwang y Masud (1979) lo incluyen en el grupo de los que requieren una definición progresiva de las preferencias. Este conflicto se origina en que incorpora características de ambos métodos. En este caso se clasificó en este grupo ya que, independientemente de que requiere información durante el proceso de búsqueda, también lo requiere "a priori".

Este algoritmo comienza obteniendo un conjunto de puntos eficientes, mediante la resolución del siguiente programa:

Función objetivo : $\text{Max } Z_r(x)$

Sujeto a: $x \in F$
 $Z_q(x) \geq L_q$
 $Z_k(x) = L_k$

donde $k \neq q, r$

Se logra un conjunto de puntos eficientes, por medio de variaciones paramétricas de L_q . A partir de esta información obtienen los valores de intercambios, así como la tasa marginal de sustitución (TMS). Una vez obtenidos, se construye un indicador (W_i), que relaciona ambos valores de la siguiente forma:

$$W_i = \frac{\text{TMS}}{\text{valores de intercambio}} - 1$$

Luego, se procede a determinar los puntos de indiferencia para un objetivo (Z_i), que están definidos como :

$$W_i Z_i = 0$$

Una vez conocido este valor Z_i , se incorpora como restricción, a la vez que se optimiza el objetivo con el que se evalúa. El resultado de este programa constituye la mejor solución.

3.1.3 La Programación Compromiso

La Programación Compromiso fue desarrollada por Zeleny (1973). Define la solución óptima como la solución eficiente que se encuentra más próxima al punto ideal, entendiendo éste como el punto donde todos los objetivos alcanzan el valor óptimo (este ideal o solución utópica constituye sólo un punto de referencia para el centro decisor). Dependiendo de la medida de la distancia utilizada, por ejemplo la métrica elegida, se puede establecer un conjunto compromiso, que es un subconjunto del conjunto eficiente.

De acuerdo con esto, se debe calcular la distancia existente entre cada punto de la curva de intercambio y el punto ideal. Para este propósito, se introduce el concepto de grado de proximidad d_j entre objetivo j -ésimo y su ideal (Amador et al, 1985a), dado por la expresión

$$d_j = Z_j^* - Z_j(x)$$

cuando el j -ésimo objetivo se maximiza, o por la expresión

$$d_j = Z_j(x) - Z_j^*$$

cuando el j -ésimo objetivo se minimiza, siendo Z_j^* el ideal.

Sin embargo, Zeleny (1982) afirma que en algunas situaciones la distancia puede ser influida por la unidad de medida elegida para los distintos objetivos. Por esta razón, es necesario trabajar con desviaciones relativas. A continuación se exponen dos de los criterios de homogenización más comúnmente empleados:

	Objetivo j -ésimo a maximizar	Objetivo j -ésimo minimizar
Criterio I	$d_j = \frac{Z_j^* - Z_j(x)}{Z_j^*}$	$d_j = \frac{Z_j(x) - Z_j^*}{Z_j^*}$
Criterio II	$d_j = \frac{Z_j^* - Z_j(x)}{Z_j^* - Z_{*j}}$	$d_j = \frac{Z_j(x) - Z_j^*}{Z_j^* - Z_{*j}}$

donde Z_j^* constituye el valor ideal y Z_{*j} el anti-ideal para el j -ésimo objetivo, éste es, el valor que toma el j -ésimo objetivo cuando el objetivo que está en conflicto con él, se optimiza.

En relación a estos dos criterios, podemos decir que el primero resulta más sencillo de operar, pero tiene la desventaja, en relación con el segundo, de que su empleo queda limitado a situaciones en las que el valor ideal es distinto a cero.

Para obtener las distancias entre cada solución y el punto ideal, la programación

compromiso introduce la siguiente familia de funciones de distancias:

$$L_p(\alpha, k) = \left| \left(\sum_{j=1}^k \alpha_j d_j \right)^p \right|^{1/p}$$

donde los coeficientes α_j ponderan la importancia de la discrepancia entre los objetivos j -ésimo y su valor ideal.

La familia de funciones de distancia que normalmente se utilizan, son $P = 1$ ésto es la métrica L_1 y $P = \infty$, ésto es la métrica L_∞ . Las otras soluciones compromiso ($1 \leq P \leq \infty$) están comprendidas entre las soluciones correspondientes a las métricas L_1 y L_∞ (Amador et al., 1985b).

Para la métrica L_1 la mejor solución compromiso se logra resolviendo un programa lineal^{7/} cuya función objetivo es la siguiente (Cohon, 1978):

$$\begin{aligned} \text{Función objetivo: } \quad \text{Min } L_1 &= \sum_{j=1}^k \alpha_j \left| \frac{Z_j^* - Z_j(x)}{Z_j^* - Z_{s_j}} \right| \\ \text{sujeto a:} \quad &x \in F \end{aligned}$$

Para la métrica L_∞ la mejor solución compromiso se obtiene resolviendo el siguiente programa lineal 6/ (Cohon, 1978).

$$\begin{aligned} \text{Función objetivo: } \quad \text{Min } L_\infty &= d \\ \text{sujeto a:} \quad &\frac{\alpha_j (Z_j^* - Z_j(x))}{Z_j^* - Z_{s_j}} \leq d \\ &x \in F \end{aligned}$$

3.2 TÉCNICAS QUE REQUIEREN UNA DEFINICIÓN PROGRESIVA DE LAS PREFERENCIAS, EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS, POR PARTE DEL CENTRO DECISOR

Estas se conocen con el nombre de técnicas interactivas, ya que requieren que se establezca una interacción entre el centro decisor y el analista. Suponen, generalmente, que el analista preste atención a tres mecanismos continuos (Figura 2).

a. Mecanismo de búsqueda. Es aquel a través del cual el analista estudia la información obtenida de la última reacción (mecanismo c).

7/ Se supone que el criterio de homogenización utilizado es el que figura en las páginas anteriores con el número ii, y que se trata de objetivos a maximizar.

b. Mecanismo de reiniciación. Es aquel que, considerando los resultados de la búsqueda anterior, crea las condiciones en las cuales se debe desarrollar la reacción próxima.

c. Mecanismo de reacción. Es aquel que, en el marco de unas condiciones previas (mecanismo b) conduce a recoger nuevas informaciones sobre las preferencias del decisor.

En este mismo sentido, Cohon y Marks (1975) afirman que los métodos incluidos en este grupo se caracterizan por el siguiente algoritmo de aproximación:

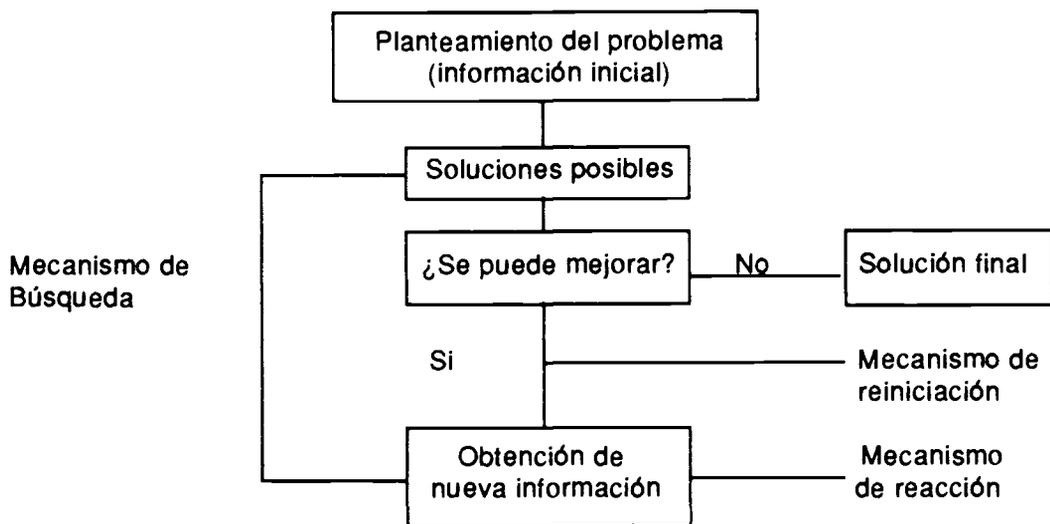
a. Obtención de una solución no inferior.

b. Obtención de la reacción del centro decisor sobre esa solución y modificación del problema, en conformidad con ésta.

c. Repetición de los pasos a) y b) hasta que se satisfagan los requerimientos del centro decisor.

Por otra parte, Goicochea et al. (1982), señalan que estos métodos se basan en los siguientes supuestos acerca del proceso de toma de decisión:

FIGURA 2. ESQUEMA GENERAL DE UN PROCEDIMIENTO INTERACTIVO



Fuente: Binelli, 1991.

a. Las ideas sobre una situación dada están influidas por el total de elementos de ésta, así como por el entorno en el cual se desenvuelve.

b. Las funciones de preferencias individuales o estructura de valores no pueden expresarse analíticamente. Sin embargo, se supone que el centro decisor si tiene un conjunto de preferencias.

c. La estructura de valores cambia con el tiempo y los distintos componentes de esa estructura pueden cambiar también frente a diferentes cantidades.

- d. Las aspiraciones o deseos de cambio son el resultado del aprendizaje y la experiencia.
- e. El centro decisor generalmente prioriza más la satisfacción que la optimización.
- f. La solución a un problema de decisión es cualquier estrategia aceptable.
- g. La "aceptabilidad" es una idea que se aprende.
- h. Maximizar (u optimizar) no es siempre un objetivo válido para todos los problemas de la vida real.

A continuación se describen brevemente los métodos interactivos más representativos de este grupo.

3.2.1 El Método STEP

Este método, que también aparece en la literatura con el nombre de STEM, fue propuesto por Benayoun et al. (1971). Conceptualmente puede ser aplicado a problemas continuos y discretos, así como también a problemas lineales y no lineales.

Antes de comenzar el algoritmo interactivo, el método STEP requiere la construcción de una matriz. Esta se logra resolviendo los siguientes programas:

$$\text{Función objetivo: } \text{Max } Z_k(x) = \sum_{j=1}^n C_{jk} X_j$$

Sujeto a: $x \in F$ para $k = 1, 2, \dots, p$

Las soluciones se recogen en la siguiente matriz:

$Z_k(x)$	$Z_1(x)$	...	$Z_k(x)$	...	$Z_p(x)$
$ZP_1(x)$	$Z^M_1(x)$	...	$Z_k(x)$	...	$Z_k(x)$
\vdots	\vdots		\vdots		\vdots
$Z_k(x)$	$Z_k(x)$	...	$Z^M_k(x)$	...	$Z_k(x)$
\vdots	\vdots		\vdots		\vdots
$Z_p(x)$	$Z_k(x)$	...	$Z_k(x)$	...	$Z^M_p(x)$

$Z^M(x)$ representa el óptimo de cada objetivo, y los $Z_k(x)$ constituyen los valores que toman los otros objetivos en esa solución óptima. También se puede identificar en cada columna un valor mínimo $Z^m(x)$.

Como se aprecia, el vector ideal está representado por la diagonal de la matriz. Estos valores no son alcanzables, por tratarse de objetivos en conflicto, sin embargo, sirven como estándares para evaluar las soluciones no dominadas.

El algoritmo consiste esencialmente en dos pasos:

Paso 1. Alcanzar la solución no dominada más próxima, en el sentido del minimax, a la solución ideal. Esto se logra resolviendo el siguiente programa:

Función objetivo Min d

sujeto a: $\pi_k (Z_k^M - Z_k(x)) \leq d, k = 1, \dots, p$
 $x \in X$

donde d representa la distancia entre cada objetivo y su solución ideal, y π_k es un peso que expresa la importancia relativa que se le asigna a la desviación. En general los π_k constituyen pesos normalizados, cuyos valores dependen de la variación entre el valor mínimo de cada objetivo y su valor ideal.

Paso 2. El centro decisor compara el vector solución con el vector ideal, e indica si la solución le satisface o no. En caso negativo, debe expresar qué objetivo de la solución puede perjudicarse para obtener un beneficio en otro que se encuentre aún en un nivel insatisfactorio.

Una vez hecho esto, se vuelve al Paso 1, introduciendo las variaciones en el programa derivadas de la información dada por el centro decisor.

3.2.2 Método Geoffrion

Este método, propuesto por Geoffrion et al. (1972), supone que el sujeto decisor tiene una función de utilidad compuesta por p funciones objetivo. Inicialmente, el problema multiobjetivo puede ser reducido a un problema con un único objetivo, cuya función objetivo sea maximizar dicha función de utilidad sujeta a las restricciones del problema. Dado que la función de utilidad no es conocida de forma explícita, el problema no puede ser resuelto directamente. Su solución, por tanto, exige aproximaciones lineales y una interacción con el sujeto decisor.

Los supuestos básicos de este modelo son: las distintas funciones objetivos son diferenciables, X es compacto y las restricciones son convexas.

El primer paso es tomar una solución cualquiera y determinar las ponderaciones que serán usadas en la función objetivo del programa que intenta determinar la dirección que tiene el problema.

Una vez obtenida esta solución, se recomienda evaluar distintos valores de objetivos. Luego, se obtiene la solución que domina y a partir de ésta se plantea otro programa para determinar la nueva dirección. Iterativamente se obtienen soluciones que se acercan a los valores considerados como óptimos para el problema.

3.2.3 Método Zions Wallenius

Este método, desarrollado por Zions y Wallenius (1976), parte del supuesto de que la función objetivo es cóncava (a maximizar), y el conjunto de restricciones tiene forma convexa. Las funciones objetivo y las restricciones no lineales deben ser previamente linealizadas.

Antes de poner en marcha el algoritmo, el decisor determina los pesos iniciales, δ (multiplicadores). Posteriormente, se procede a generar la función objetivo compuesta, que toma la siguiente forma:

$$\text{Max} \quad \sum_{i=1}^k \delta_i f_i(x), \quad \sum_{i=1}^k \delta_i = 1$$

Las restricciones deben ser transformadas en igualdades a través de la incorporación de variables de desviación. Una vez planteado el programa, se llega a los valores de los distintos objetivos, así como a la diferenciación entre variables no básicas (variables de desviación cuyo valor es 0) y básicas (variables de desviación con valor $\neq 0$). Luego, incorporando tanto las variables no básicas como las básicas, se determina el conjunto de variables eficientes. Obtenidas éstas, viene una fase de decisión en la que se evalúan los resultados con respecto a una función de utilidad, y se inicia la próxima fase, que es la búsqueda de nuevas ponderaciones (multiplicadores). Una vez alcanzado ésto, se entra a la segunda interacción siguiendo los mismos pasos arriba explicados. El algoritmo se detiene cuando al evaluar la variable eficiente con la función de utilidad se concluye que los intercambios no son atractivos.

3.2.4 Método SEMOPS (Sequential Multiobjective Problem Solving).

Este método propuesto por Monarchi et al. (1973), es no lineal; se basa en la minimización de las desviaciones de un nivel dado de los objetivos.

El algoritmo requiere previamente la definición de los niveles de aspiración (AL_i) que desea el centro decisor para sus objetivos. Paralelamente, se define un rango para cada objetivo (f_M y f_m), que no necesariamente es el máximo y el mínimo. Con ésto se transforma cada objetivo ($f_i(x)$), de acuerdo a la siguiente igualdad:

$$Y_i(x) = \frac{f_i(x) - f_m}{f_M - f_m} + \epsilon$$

donde ϵ es un valor positivo y pequeño.

De la misma manera, se transforman los niveles de aspiración de cada objetivo.

$$A_i = \frac{AL_i - f_m}{f_M - f_m} + \epsilon$$

Se definen cinco tipos de objetivos y sus correspondientes medidas de desviación d_i (Chankong y Haimes, 1983).

En cada prueba, valores de $d_i \leq 1$ implican que el objetivo está satisfecho, exceptuando el caso "mayor que".

El problema principal de cada iteración se resuelve por medio de:

$$\text{Min } S = \sum_{t \in T} d_t$$

donde t es un subconjunto del conjunto de T objetivos.

3.2.5 Método del Valor de las Sustituciones (SWT)

Este método propuesto por Haimes y Hall (1974), utiliza la noción de tasas de sustitución entre los objetivos. El primer paso de su aplicación es seleccionar un objetivo particular, sirviendo éste como referencia (comúnmente se elige un indicador monetario). Con la ayuda de un vector de restricciones arbitrarias el algoritmo comienza por definir una primera solución, maximizando el objetivo de referencia.

Las tasas de sustitución son calculadas con respecto a este objetivo, luego son presentadas al decisor y éste debe anotarlas dentro de una escala predeterminada (por ejemplo: de -10 a +10) utilizando la siguiente regla:

- a. La nota cero (0) implica que la sustitución le es indiferente, ya que un aumento o disminución de k unidades del objetivo es juzgada equivalente a una disminución de una unidad del objetivo de referencia.
- b. La nota es positiva si la sustitución es aceptada; es negativa si es rechazada.
- c. La nota es tanto más fuerte, en valor absoluto, como la sustitución sea deseada, o indeseada para las notas negativas.

Estas notas de tasas de sustitución permiten al decisor establecer una escala de aceptación de ellas, a fin de determinar una dirección de búsqueda privilegiada. Luego de la interacción siguiente, esta dirección se materializa en un nuevo conjunto de restricciones menos elástico utilizando los valores relativos de las notas. Varias técnicas que permiten asociar estas notas con el nuevo conjunto de restricciones, fueron analizadas por Chankong (1977).

El proceso llega a su fin cuando todas las notas se igualan a cero (0) y todas las sustituciones son indiferentes, por lo cual no hay más dirección de búsqueda y la solución obtenida es la de mayor compromiso.

Existe una serie de variantes a este método desarrolladas por el mismo autor. Una síntesis de ellas se pueden apreciar en: "Caso de Varios Decisores" (Hall y Haimes, 1976); "Uso de Variables Estadísticas" (Haimes et al., 1980); y "Consideración de una Estructura Jerárquica de Objetivos", Haimes y Tarvainen, 1981.

3.2.6 Método Roy

El método de Roy (1976), también llamado "método del punto de mira", es una variación del método STEP para hacer de éste un proceso de aprendizaje. Utiliza:

- a. Una distancia de Tchebycheff aumentada.
- b. Un ideal aumentado, desplazado durante el transcurso del proceso.

c. Un sistema de ponderación basado en los niveles de aspiración del centro decisor. Para cada interacción el decisor debe determinar sus niveles Z_i^* para cada objetivo. Los pesos son calculados del siguiente modo:

$$W_i = (Z_i^{**} - Z_i^0)^{-1}$$

donde: Z_i^{**} = valor ideal aumentado para el objetivo i .

Este sistema de ponderaciones que permite favorecer los niveles de aspiración más próximos al ideal, puede ser considerado como una dirección privilegiada de búsqueda.

Para cada interacción no importa qué objetivo sea relajado (incluidos los que lo fueron antes). De hecho, la convergencia del algoritmo no está garantizada y Z_n no pertenece necesariamente a Z_{n-1} .

3.2.7 El Método de Vincke

En esta aproximación interactiva, descrita por Vincke (1976), se utiliza, al igual que el método STEP, el primer punto calculado como base para un análisis de sensibilidad, sustentado en la información entregada por el centro decisor concerniente a:

- a. Aceptación de concesiones sobre los objetivos.
- b. Niveles de aspiración mínimos sobre ciertos criterios.
- c. Modificación de restricciones sobre los objetivos previamente determinados.

De acuerdo a que la última posibilidad de convergencia del algoritmo no está garantizada, se trata de la exploración de un conjunto de soluciones (proceso de aprendizaje o interacción).

Para cada modificación propuesta por el decisor se asocia un análisis de coeficientes marginales, lo que se hace posible gracias a la introducción en el programa matemático de variables de desviación. Estos coeficientes pueden ser analizados sin tener que calcular por optimización un nuevo punto. Gracias a los coeficientes marginales asociados a estas variables los cálculos en este método son muy simples.

Inicialmente "n+1" optimizaciones son necesarias para calcular el ideal de la solución referencial. En seguida, basta cambiar los valores de las variables de base en el trabajo del programa matemático (Simplex).

Mientras tanto, si la solución inicial se aleja del punto ideal o de mayor compromiso, el número de iteraciones puede elevarse fuertemente.

3.2.8 El Método de Vanderpooten

El Método de Vanderpooten (1988), tiende, al igual que los anteriores, a reducir el conjunto de soluciones por la vía de agregar progresivamente un mayor número de restricciones al modelo. En cada iteración se calcula el punto más cercano al ideal, el que es presentado al decisor quien debe indicar los criterios para mejorar la solución. Si ella satisface las aspiraciones, termina el proceso. Al agregar nuevas restricciones se permite generar un conjunto de soluciones y calcular el nuevo ideal.

La nueva solución se compara con la anterior a fin de determinar si la pérdida es razonable. Si no es así, el decisor debe dar para cada objetivo el sacrificio mínimo aceptable, lo que permite agregar nuevas restricciones y buscar mejores soluciones. Cabe hacer notar que este método introduce en forma implícita la utilización de tasas de sustitución entre objetivos.

3.3 TÉCNICAS QUE REQUIEREN "A POSTERIORI" UNA DEFINICIÓN DE LAS PREFERENCIAS POR PARTE DEL CENTRO DECISOR

3.3.1 Programación Multiobjetivo

Las técnicas de Programación Multiobjetivo, también llamadas técnicas de optimización vectorial, se enfrentan al problema de optimizar simultáneamente varios objetivos lineales. Así, la programación multiobjetivo se diferencia básicamente de la programación por metas, por trabajar con objetivos en lugar de metas. Como es imposible definir un óptimo cuando existen varios objetivos en conflicto, la programación multiobjetivo en vez de buscar una solución óptima, trata de encontrar un conjunto de soluciones eficientes no dominadas u óptimos de Pareto.

Luego de esta consideración, se formula el modelo de programación multiobjetivo dentro del siguiente marco general:

$$\text{Eff } Z_{(x)} = [Z_1(x), Z_2(x), \dots, Z_p(x)]$$

Sujeto a: $x \in F$

donde: Eff = significa la búsqueda de soluciones eficientes en el conjunto a optimizar;

$Z(x)$ = función objetivo p-dimensional (p objetivos); y

F = conjunto factible.

3.3.2 Generación del conjunto eficiente

Para generar o al menos aproximar el conjunto eficiente, existen una serie de enfoques. Estos son:

a) *Método de las Ponderaciones.*

De los distintos enfoques utilizados para generar el conjunto de soluciones eficientes, ésta fue la primera en desarrollarse. Zadeh (1963), citado por Cohon (1978), fue quien propuso este método.

Su idea básica consiste en combinar (agregar) todos los objetivos en una función única. Con este propósito, se asocia un peso o coeficiente de ponderación a cada uno de

los objetivos, procediéndose después a agregar todos los objetivos, para luego, parametrizando los valores de los coeficientes de ponderación, conseguir generar el conjunto eficiente. De acuerdo con esto, el problema para dos objetivos, por ejemplo, vendrá dado por:

Función objetivo general: $\text{Eff } Z(x) = [Z_1(x), Z_2(x)]$

Función objetivo del enfoque en particular: Optimizar $Z_{(w_1, w_2)} = W_1 Z_1(x) + W_2 Z_2(x)$

Sujeto a $x \in F$

donde: W_1 y $W_2 =$ constituyen las ponderaciones que se le asignan a cada objetivo
 $F =$ conjunto factible.

b) Método de las Restricciones

Este enfoque propone elegir un objetivo del total de ellos y proceder a su optimización, e incluir el resto dentro del conjunto de restricciones. Al respecto, en un trabajo de Willis y Perlack (1980a), se afirma que la selección del objetivo a incluir en la función objetivo es arbitraria, y no afecta la generación de la solución eficiente. Por medio de variaciones paramétricas de los términos independientes de los objetivos incluidos como restricciones, se va generando el conjunto eficiente.

Fue Marglin (1967), citado por Cohon (1978), quien desarrolló por primera vez este método, en cuyo caso el problema para dos objetivos se expresa así:

Función objetivo general: $\text{Eff } Z(x) = [Z_1(x), Z_2(x)]$

Función objetivo del método en particular: Optimizar $Z_1(x)$

Sujeto a $Z_2(x) > L$
 $x \in F$

Donde $L =$ término independiente del objetivo incluido como restricciones. Los valores extremos de L se obtienen generalmente maximizando y minimizando $Z_2(x)$, sujeto a las restricciones del modelo.

c) Método NISE (Non Inferior Set Estimation)

Este método fue desarrollado por Cohon et al (1979), para problemas con dos objetivos. Se basa fundamentalmente en una agregación de objetivos, los cuales son ponderados por el valor del numerador y denominador del cociente que define la pendiente de una recta; recta que constituye el límite inferior de una zona llamada no inferior, que es la zona donde se acepta que se encuentran los puntos eficientes.

Para esto, se debe proceder, en primer lugar, a optimizar cada uno de los objetivos por separado; con el valor óptimo de cada objetivo y el valor que tome un objetivo al ser optimizado el otro, se obtienen dos puntos en el campo de los objetivos.

La recta que une ambos puntos constituye el límite inferior de las soluciones eficientes. Con las componentes del cociente que define su pendiente se ponderan los objetivos que luego se agregan, formándose una nueva función objetivo que se intenta maximizar, obteniéndose un tercer punto.

Se procede a unir ese punto con los dos anteriores, con lo cual se obtienen dos rectas (límites inferiores de las zonas no inferiores) y sus correspondientes pendientes. Se lleva a cabo el mismo proceso anterior en las zonas no inferiores creadas, repitiéndose el proceso para cada punto eficiente alcanzado.

Después de cada punto eficiente obtenido el Método NISE, permite evaluar el error en la estimación, por lo que el centro decisor puede determinar si ésta es aceptable o hay que seguir buscando puntos eficientes en una determinada zona no inferior.

La notación en este caso, es la siguiente:

Función objetivo general: $\text{Eff } Z_{(x)} = (Z_1(x), Z_2(x))$

Función objetivo del método en particular: $\text{Max } Z_{(x)} = (W_1 Z_1(x) + W_2 Z_2(x))$

Sujeto a $x \in F$

Donde: $\frac{W_1}{W_2}$

es la pendiente de los distintos segmentos de rectas que se van generando.

d) Método Simplex Multiobjetivo

Básicamente este enfoque consiste en generar el conjunto de soluciones eficientes, desplazándose de un punto extremo factible a un punto extremo eficiente, y luego de éste a los puntos extremos eficientes que le sean adyacentes.

Uno de los primeros Simplex Multiobjetivo fue presentado por Evans y Steuer (1973). En esta línea, Isermann (1977), presenta otro algoritmo para la obtención del conjunto de soluciones eficientes. Por otra parte, Cohon (1978) y Zeleny (1982), muestran con bastante detalle un programa escrito en lenguaje Fortran IV por Zeleny. Por último Chankong y Haimes (1983), presentan un análisis exhaustivo del soporte teórico de este enfoque.

3.3.3 Ventajas y desventajas de cada enfoque para obtener el conjunto de soluciones eficientes

Según Willis y Perlack (1980a), el método de las restricciones es preferido al método de las ponderaciones, pues no tiene la limitante relacionada con la exigencia de la estricta convexidad del espacio de los objetivos.

El método NISE, en cambio, presenta dos importantes ventajas sobre los métodos de las restricciones y de las ponderaciones. Por una parte, asegura una cobertura completa del conjunto eficiente con un mínimo de puntos, y por otra, da la posibilidad de controlar la calidad de las aproximaciones del conjunto eficiente (Cohon, 1978).

Los otros métodos son relativamente más fáciles de aplicar y además son utilizables en problemas con más de dos objetivos. Se puede añadir también, que los métodos de las restricciones y ponderaciones pueden, eventualmente, entregar puntos eficientes incluidos todos en una recta con lo cual se sobrecarga al centro decisor con información que no aporta novedades.

El método Simplex Multiobjetivo representa, sin duda, el mejor método por cuanto entrega una exacta representación del conjunto eficiente. Sin embargo, tiene el inconveniente de la disponibilidad de los software correspondientes.

3.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS DISTINTAS TÉCNICAS DE PROGRAMACIÓN MULTICRITERIO

Uno de los mayores problemas que presenta la programación por metas es la gran cantidad de información que necesita para su aplicación. Por el hecho de trabajar con metas, necesita una definición clara de los niveles de aspiración para cada uno de los objetivos en cuestión. Por otra parte, es preciso asignarle pesos específicos a cada una de las metas o, en su defecto, proceder a una ordenación excluyente de las mismas.

La programación multiobjetivo, por el contrario, al trabajar con objetivos (por ejemplo minimizar el riesgo) no requiere información sobre niveles de aspiración y, como se dijo anteriormente, la articulación de las preferencias sólo se necesita una vez obtenido el conjunto eficiente.

En relación con la información ofrecida, la programación por metas da los valores (en el campo de los objetivos) correspondientes a una única solución. En contraposición, la información aportada por la programación multiobjetivo es amplia, ya que responde a todas las soluciones eficientes.

Debido a esta amplitud de información, justamente, se produce la principal debilidad de este método ya que se sobrecarga el centro decisor con información, dificultando así la toma de decisión (Romero, 1985a). Por su parte, la eficiencia operativa de la programación por metas es mejor y, en consecuencia, el costo computacional también lo es (Willis y Perlack, 1980b). El desarrollo de los llamados métodos interactivos ofrecen una buena alternativa a este problema. Al respecto, es importante considerar el trabajo de Steuer y Schuler (1978), en donde se desarrolla un modelo que tiene la particularidad de utilizar técnicas de filtrado, descartando así soluciones insuficientemente diferentes.

En el Cuadro 2 se resumen los aspectos antes citados.

CUADRO 2. EVALUACIÓN DE ALGUNAS TÉCNICAS DE PROGRAMACIÓN MULTICRITERIO

Tipo de modelo	Información requerida	Nº de soluciones	Información dada
Programación multiobjetivo (método de las restricciones y método de las ponderaciones)	mínima	K^{P-1}	máxima
Programación por metas	máxima	1	insuficiente
Métodos interactivos	intermedia	$< K^{P-1}$	suficiente

P = número de objetivos

K = número de intervalos considerados para cada objetivo en el análisis paramétrico.

Otro aspecto a considerar es la posibilidad de obtener soluciones óptimas inferiores. Al respecto, Romero y Rehman (1985a) afirman que en la programación por metas, existe la posibilidad de obtener soluciones óptimas dominadas, cuando esta técnica se aplica a situaciones donde los niveles de aspiraciones asociados a cada uno de los objetivos son muy pesimistas y, en consecuencia, la solución óptima incluye el valor cero para un número grande de variables de desviación. Agregan que es posible solucionar este problema a través de dos enfoques. El primero consiste en realizar un análisis paramétrico de los niveles de aspiración, viendo con ello si es posible incrementar la satisfacción de algunas metas sin reducir el logro de otras, y el segundo en utilizar un test de no dominancia.

En relación con la programación por metas lexicográficas, Romero y Rehman (1985b) han indicado que cuando el total de metas son asignadas a un número grande de prioridades (priorización ingenua), existe la posibilidad de que las metas incluidas en las prioridades inferiores no cumplan con un rol activo en el problema que se está abordando. La explicación de ésto surge del hecho de que todos los algoritmos de solución de este tipo de modelos suponen que el primer problema de la secuencia presenta soluciones óptimas alternativas, y de no ser así, el algoritmo se detiene y todas las metas situadas en niveles inferiores no juegan ningún papel (metas redundantes). De aquí la necesidad de trabajar con un número bajo de metas (en general se recomienda un máximo de cinco prioridades).

CAPÍTULO 4
Aplicaciones a Problemas
de Diseño de Sistemas
de Producción Campesinos

Para identificar mejor las fortalezas y debilidades de estas técnicas como instrumentos de apoyo a la fase de diseño de la metodología de investigación y desarrollo de sistemas de producción (IDSP), a continuación se presentan tres aplicaciones. En la primera de ellas se detallan aspectos relativos a la construcción del modelo, así como a sus resultados; en las otras dos aplicaciones, se detallan con fines de síntesis, el material, el método utilizado y los resultados.

Los tres trabajos se han obtenido de tesis de grado de estudiantes de la Facultad de Ciencias Veterinarias y Pecuarias de la Universidad de Chile, cuyos objetivos son:

- a. Comprender mejor la estructura y funcionamiento interno de los sistemas de producción.
- b. Apoyar en el diseño y planificación de soluciones de los principales problemas, evaluando *ex-ante* su probable impacto directo.

Las técnicas utilizadas fueron la programación multiobjetivo; un modelo interactivo específicamente el método desarrollado por Benayoun et al. (1971); y la programación compromiso.

4.1 PRIMERA APLICACIÓN: PROGRAMACIÓN MULTI OBJETIVO (RIVAS, 1990)

A. Material y método utilizado

El Grupo de Investigaciones Agrarias (GIA), se encuentra realizando un proyecto de desarrollo en la Octava Región de Chile. En la primera etapa del proyecto se tipificaron y clasificaron los diferentes sistemas de producción campesinos existentes en la zona, utilizando técnicas de estadística multivariada (análisis de conglomerados y análisis de componentes principales). Como resultado de estos análisis se conformaron ocho grupos, cada uno compartiendo características comunes.

El universo en estudio corresponde a uno de estos ocho grupos que se ubica en la zona de San Jorge, comuna de San Carlos. Sus características esenciales son: está constituido por predios que fueron entregados en propiedad a sus actuales dueños el año 1976, tras un período en el cual se trabajaron colectivamente en forma de Asentamiento Campesino; generan ingresos medianos a altos con moderados rendimientos por hectárea; tienen suelos correspondientes a la serie Arrayán tipos I y III con topografía plana de riego y con temperaturas que oscilan entre los 10 y 30°C en verano y entre los -2 y 15°C en invierno.

El trabajo se dividió en dos etapas. La primera consistió en la recolección de datos, mediante una encuesta dinámica, de frecuencia mensual, aplicada en forma de entrevista. La segunda, comprendió la construcción del modelo y la posterior evaluación de distintas acciones de desarrollo sobre los objetivos de los campesinos. Estas acciones de desarrollo deben ser entendidas como asignaciones de recursos tendientes a modificar la situación de las economías campesinas sujeto del estudio.

Para la construcción del modelo se utilizó como herramienta matemática la Programación Multiobjetivo. Como se mencionó anteriormente, esta técnica, también llamada de optimización vectorial, enfrentada a un problema con objetivos múltiples trata de

encontrar un conjunto de soluciones eficientes, es decir, reemplazar el tradicional concepto de óptimo por la idea de eficiencia o no dominancia.

En relación con la evaluación de acciones de desarrollo^{8/}, se procedió a introducir las en el modelo, a través de:

- a. Modificación de los coeficientes de las variables de decisión, cuando se trata de evaluar la introducción de nuevas tecnologías a las alternativas productivas existentes.
- b. Introducción de nuevas variables de decisión al modelo, cuando se trata de evaluar la incorporación de nuevas alternativas productivas a los sistemas de producción campesina.
- c. Modificación de los términos independientes del modelo, cuando se trata de evaluar relajación de las restricciones de los distintos sistemas de producción campesinos existentes.

B. Resultados y discusión

B.1 Estructura teórica del modelo

La construcción del modelo matemático de análisis y evaluación del sistema parcelero en un contexto de objetivos múltiples, hace necesario definir claramente, las variables de decisión, los objetivos del parcelero, y las restricciones del sistema.

a) Variables de decisión

- X_1 = Número de hectáreas dedicadas a remolacha
- X_2 = Número de hectáreas dedicadas a trigo
- X_3 = Número de hectáreas dedicadas a frejol
- X_4 = Número de hectáreas dedicadas a producción de carne bovina

b) Objetivos del parcelero

Los objetivos señalados por los parceleros para su sistema de producción son la maximización del margen bruto predial generado por el sistema; la minimización del riesgo económico predial; y la optimización del uso de mano de obra familiar, a nivel predial.

Tanto el primero como el segundo objetivo fueron expresados directamente por los campesinos, el tercero se originó en la necesidad de disminuir la mano de obra que declararon contratar los campesinos.

i) Maximización del margen bruto predial generado por el sistema

La expresión matemática de este objetivo es la siguiente:

$$\text{Max } F_1 = MB_1 X_1 + MB_2 X_2 + MB_3 X_3 + MB_4 X_4$$

8/ Esta metodología fue utilizada en las tres aplicaciones desarrolladas en este contexto.

donde: MB_i = margen bruto de la i -ésima alternativa productiva.

X_i = la superficie ocupada por la i -ésima alternativa productiva

ii) Minimización del riesgo económico predial

Para el análisis y evaluación de este objetivo se utilizó el modelo de Hazell (Hazell, 1971), por medio del cual se definió el riesgo como la sumatoria de las desviaciones de los márgenes brutos de cada alternativa productiva, con respecto al promedio del margen bruto de cada una de ellas para cada año, en el período de siete años que abarcó el estudio (1982-1988).

Debido a que este objetivo busca que la sumatoria de las desviaciones sea cero, deben minimizarse las variables de desviación^{9/} tanto negativas como positivas (Ignizio, 1976). De acuerdo con esto, la expresión matemática de este objetivo es:

$$\text{Min } F_2 = X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{17} + X_{18}$$

sujeto a:

$$(MB_1 X_1 - MB^*_1 X_1) + (MB_1 X_2 - MB^*_2 X_2) + (MB_1 X_3 - MB^*_3 X_3) + (MB_1 X_4 - MB^*_4 X_4) + X_5 - X_6 = 0$$

$$(MB_2 X_1 - MB^*_1 X_1) + (MB_2 X_2 - MB^*_2 X_2) + (MB_2 X_3 - MB^*_3 X_3) + (MB_2 X_4 - MB^*_4 X_4) + X_7 - X_8 = 0$$

$$(MB_3 X_1 - MB^*_1 X_1) + (MB_3 X_2 - MB^*_2 X_2) + (MB_3 X_3 - MB^*_3 X_3) + (MB_3 X_4 - MB^*_4 X_4) + X_9 - X_{10} = 0$$

$$(MB_4 X_1 - MB^*_1 X_1) + (MB_4 X_2 - MB^*_2 X_2) + (MB_4 X_3 - MB^*_3 X_3) + (MB_4 X_4 - MB^*_4 X_4) + X_{11} - X_{12} = 0$$

$$(MB_5 X_1 - MB^*_1 X_1) + (MB_5 X_2 - MB^*_2 X_2) + (MB_5 X_3 - MB^*_3 X_3) + (MB_5 X_4 - MB^*_4 X_4) + X_{13} - X_{14} = 0$$

$$(MB_6 X_1 - MB^*_1 X_1) + (MB_6 X_2 - MB^*_2 X_2) + (MB_6 X_3 - MB^*_3 X_3) + (MB_6 X_4 - MB^*_4 X_4) + X_{15} - X_{16} = 0$$

$$(MB_7 X_1 - MB^*_1 X_1) + (MB_7 X_2 - MB^*_2 X_2) + (MB_7 X_3 - MB^*_3 X_3) + (MB_7 X_4 - MB^*_4 X_4) + X_{17} - X_{18} = 0$$

donde X_5 a X_{18} = variables de desviación.

MB_i = margen bruto de la alternativa productiva del i -ésimo año.

MB^*_j = margen bruto promedio del cultivo para el período en estudio, para la variable de decisión j .

iii) Optimización del uso de mano de obra familiar

Para abordar este objetivo se dividió el ciclo agrícola en tres períodos, que corresponden a etapas con características definidas según los requerimientos y la disponibilidad de la mano de obra familiar. Los períodos son: enero - abril; mayo - agosto; y septiembre - diciembre

Su expresión matemática es:

$$\text{Min } F_3 = X_{19} + X_{20} + X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{24}$$

$$\begin{aligned} \text{Sujeto a: } & A_1 X_1 + B_1 X_2 + C_1 X_3 + D_1 X_4 + X_{19} - X_{20} = H_1 \\ & A_2 X_1 + B_2 X_2 + C_2 X_3 + D_2 X_4 + X_{21} - X_{22} = H_2 \\ & A_3 X_1 + B_3 X_2 + C_3 X_3 + D_3 X_4 + X_{23} - X_{24} = H_3 \end{aligned}$$

donde: A_i = horas/hombre requeridas por el cultivo remolacha en el i-ésimo período.

B_i = horas/hombre requeridas por el cultivo trigo en el i-ésimo período.

C_i = horas/hombre requeridas por el cultivo frejol en el i-ésimo período.

D_i = horas/hombre requeridas por la ganadería en el i-ésimo período.

H_i = disponibilidad de mano de obra de origen familiar, en horas/hombre totales en el i-ésimo período.

c) Restricciones del Sistema

Las restricciones presentadas por el sistema se pueden definir y dividir de la siguiente manera:

i) De tierra

La superficie máxima utilizada por el conjunto de alternativas productivas (variables de decisión) debe ser igual al tamaño de la parcela. Matemáticamente se expresa:

$$X_1 + X_2 + X_3 + X_4 = S$$

donde: S = superficie total correspondiente al tamaño de la parcela.

ii) Agronómicas

Para el caso de sistemas campesinos, la Industria Azucarera Nacional S.A. (IANS), determina una rotación mínima de tres años para una superficie destinada al cultivo de remolacha. La expresión matemática es la siguiente:

$$X_1 \leq S/4$$

iii) De capital

Se refiere al capital disponible para realizar un ciclo agrícola y se expresa:

$$C_1 X_1 + C_2 X_2 + C_3 X_3 + C_4 X_4 \leq K$$

donde: C_i = costos directos de la i -ésima alternativa productiva.

K = capital disponible por el sistema.

iv) De autoconsumo

Determina una superficie mínima para los cultivos trigo y frejol, por destinarse parte de su producción al consumo familiar. Matemáticamente se expresan :

$$\begin{aligned} X_2 &\geq L \\ X_3 &\geq M \end{aligned}$$

donde: L = superficie mínima que se debe dedicar al trigo para satisfacer el consumo familiar.

M = superficie mínima que se debe dedicar al frejol para satisfacer el consumo familiar.

v) De superficie mínima

Para el cultivo de remolacha, IANSA determina como superficie mínima una hectárea física. Se expresa:

$$X_i \geq N$$

donde: N = superficie mínima determinada por IANSA para cultivar la remolacha.

Un resumen del modelo estructural de análisis por Programación Multiobjetivo para sistemas de producción campesino se presenta en el Cuadro 3.

CUADRO 3. MODELO ESTRUCTURAL DE ANÁLISIS POR PROGRAMACIÓN MULTI OBJETIVO

Funciones objetivos :

$$\text{Max } F_1 = MB_1 X_1 + MB_2 X_2 + MB_3 X_3 + MB_4 X_4$$

$$\text{Min } F_2 = X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{17} + X_{18}$$

$$\text{Min } F_3 = X_{19} + X_{20} + X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{24}$$

Sujetas a:

$$X_1 + X_2 + X_3 + X_4 = S$$

$$X_1 \leq S/4$$

$$C_1 X_1 + C_2 X_2 + C_3 X_3 + C_4 X_4 \leq K$$

$$(MB_1 X_1 - MB^*_1 X_1) + (MB_1 X_2 - MB^*_2 X_2) + (MB_1 X_3 - MB^*_3 X_3) + (MB_1 X_4 - MB^*_4 X_4) + X_5 - X_6 = 0$$

$$(MB_2 X_1 - MB^*_1 X_1) + (MB_2 X_2 - MB^*_2 X_2) + (MB_2 X_3 - MB^*_3 X_3) + (MB_2 X_4 - MB^*_4 X_4) + X_7 - X_8 = 0$$

$$(MB_3 X_1 - MB^*_1 X_1) + (MB_3 X_2 - MB^*_2 X_2) + (MB_3 X_3 - MB^*_3 X_3) + (MB_3 X_4 - MB^*_4 X_4) + X_9 - X_{10} = 0$$

$$(MB_4 X_1 - MB^*_1 X_1) + (MB_4 X_2 - MB^*_2 X_2) + (MB_4 X_3 - MB^*_3 X_3) + (MB_4 X_4 - MB^*_4 X_4) + X_{11} - X_{12} = 0$$

$$(MB_5 X_1 - MB^*_1 X_1) + (MB_5 X_2 - MB^*_2 X_2) + (MB_5 X_3 - MB^*_3 X_3) + (MB_5 X_4 - MB^*_4 X_4) + X_{13} - X_{14} = 0$$

$$(MB_6 X_1 - MB^*_1 X_1) + (MB_6 X_2 - MB^*_2 X_2) + (MB_6 X_3 - MB^*_3 X_3) + (MB_6 X_4 - MB^*_4 X_4) + X_{15} - X_{16} = 0$$

$$(MB_7 X_1 - MB^*_1 X_1) + (MB_7 X_2 - MB^*_2 X_2) + (MB_7 X_3 - MB^*_3 X_3) + (MB_7 X_4 - MB^*_4 X_4) + X_{17} - X_{18} = 0$$

$$A_1 X_1 + B_1 X_2 + C_1 X_3 + D_1 X_4 + X_{19} - X_{20} = H_1$$

$$A_2 X_1 + B_2 X_2 + C_2 X_3 + D_2 X_4 + X_{21} - X_{22} = H_2$$

$$A_3 X_1 + B_3 X_2 + C_3 X_3 + D_3 X_4 + X_{23} - X_{24} = H_3$$

$$X_2 \geq L$$

$$X_3 \geq M$$

$$X_1 \geq N$$

B.2 Especificación del modelo

A partir de la información recogida en terreno y ordenadas en fichas técnicas y de costos, se asignaron valores a los coeficientes de las variables como también a los términos independientes. La especificación del modelo dio origen al modelo operativo que aparece en el Cuadro 4.

CUADRO N° 4. MODELO OPERATIVO

	Alternativas productivas				Variables de Desviación del Riesgo Económico													Variables de Desviación de la Optimización del Uso de Mano de Obra		SIGNIFICADO								
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄				
1	1	1	1	1																						=	13,8	Superficie Predial (ha)
2	1																									≤	3,45	Máximo de Remolacha (ha)
3	65,20	50,90	47,90	26,10																						≤	600	Capital de Trabajo M\$
4	-193,50	38,90	-23,90	-10,90																						=	0	Riesgo Año 1
5	-57,60	-30,90	-16,40	-17,40			1	-1																		=	0	Riesgo Año 2
6	-48,90	-19,20	44,90	-11,50																						=	0	Riesgo Año 3
7	84,50	14,20	-43,50	-6,25							1	-1														=	0	Riesgo Año 4
8	136,50	33,30	-19,20	11,43									1	-1												=	0	Riesgo Año 5
9	57,80	-10,30	12,40	21,40											1	-1										=	0	Riesgo Año 6
10	21,30	-25,60	44,70	13,10													1	-1								=	0	Riesgo Año 7
11	32,00	5,28	182,00	44,00															1	-1						=	2,684	Mano de Obra Disponible (hrs.)
12	341,00	15,00		44,00															1	-1						=	2,372	Mano de Obra Disponible (hrs.)
13	317,00	5,00	134,00	20,00																	1	-1				=	2,500	Mano de Obra Disponible (hrs.)
14		1																								≥	0,5	Mínimo Trigo (ha)
15																										≥	0,25	Mínimo Poroto (ha)
16	1																									≥	1	Mínimo Remolacha (ha)
	303,024	165,734	171,550	35,514																						Z ₁ Máx		Margen Bruto M\$
																										Z ₂ Mín		Riesgo Económico M\$
																										Z ₃ Mín		Variables Desvío (hrs.)

B.3 Resultados de la aplicación del modelo

Los resultados de la aplicación del modelo en el campo de los objetivos y de las variables de decisión (alternativas productivas), se observan en el Cuadro 5. Al analizarlo queda de manifiesto el alto grado de conflicto existente entre la maximización del margen bruto y la minimización del riesgo económico, y la mayor complementariedad entre ambos objetivos con la optimización de la mano de obra familiar.

CUADRO 5. SOLUCIONES EFICIENTES

Soluciones Eficientes	Funciones Objetivo			Variables de Decisión			
	Z ₁ Margen Bruto (M\$)	Z ₂ Riesgo (M\$)	Z ₃ Mano de Obra (hrs.)	X ₁ Remolacha Azucarera (ha)	X ₂ Trigo (ha)	X ₃ Frejoles (ha)	X ₄ Ganado de Carne (ha)
A	<u>2,005.18</u>	2,480.45	4,339.30	3.45	0.50	4.24	5.61
B	2,046.04	2,223.01	4,260.20	3.07	0.50	4.92	5.31
C	2,042.97	2,171.64	<u>4,533.60</u>	2.95	0.50	5.14	5.21
D	1,898.68	1,107.42	2,549.90	1.00	4.50	4.08	4.22
E	1,877.18	<u>1,038.18</u>	2,267.45	1.00	5.38	3.08	4.34
F	2,007.17	1,899.39	3,808.97	2.53	1.55	4.77	5.02

El vector dado por los valores subrayados constituye el vector ideal, o sea el punto en el cual todos los objetivos adquieren su valor óptimo.

Otro antecedente que nos muestra el Cuadro 5, que es muy importante para el centro decisor al momento de evaluar diferentes alternativas de acción, es la medida de los intercambios entre los tres objetivos. Así por ejemplo la solución E sólo será preferida a la solución D si el sacrificio de 282.4 horas de trabajo y M\$ 21.5 de margen bruto, le es compensado al centro decisor con una disminución del riesgo económico en al menos M\$ 69.2.

Al observar las variables de decisión, se verifica la fuerte relación existente entre el objetivo, margen bruto y la superficie dedicada al cultivo de remolacha azucarera, lo que reafirma la importancia de este cultivo en el ingreso de las unidades campesinas de esta zona. Al ganado y el trigo se les puede, en cambio, atribuir un rol estabilizador, debido fundamentalmente a su bajo riesgo económico.

Si observamos los valores del objetivo optimización de mano de obra familiar, notamos que la utilización máxima es de un 60% del total disponible. El análisis por período del uso de mano de obra (Cuadro 6), nos indica que en ninguna época del año la disponibilidad de mano de obra familiar es sobrepasada por los requerimientos.

CUADRO 6. EXCESO DE MANO DE OBRA FAMILIAR, POR PERÍODO (horas)

Soluciones Eficientes	Enero-Abril	Mayo-Agosto	Septiembre-Diciembre
A	1,552.15	941.30	723.25
B	1,454.71	1,082.77	758.33
C	1,421.96	1,130.22	770.12
D	1,699.33	1,777.89	1,528.89
E	1,872.41	1,759.32	1,656.82
F	1,519.25	1,266.16	961.62

Por último, se presenta lo que realmente realizan los campesinos con miras a su comparación con los resultados entregados por el modelo.

Para la obtención de lo que denominaremos "punto real" del sistema, utilizaremos la combinación de alternativas de un sistema TIPO, que es el formado por el promedio de hectáreas de cada alternativa productiva que presentan los campesinos encuestados. Con este procedimiento se busca que el punto real sea representativo del conjunto de parcelas encuestadas. En este caso, el sistema TIPO quedó diseñado estructuralmente de la siguiente manera:

- Superficie total del predio: 13.8 has
- Superficie dedicada a remolachas: 2.0 has
- Superficie dedicada a trigo: 3.8 has
- Superficie dedicada a frejol: 3.0 has
- Superficie dedicada a producción de carne bovina: 5.0 has

El vector que muestra el nivel que alcanzan los objetivos en el punto real es el siguiente.

VECTOR REAL $R = (Z_1, 1,928.05; Z_2, 1,651.55; Z_3, 4,591.90)$

Al comparar esta información con la presentada en el Cuadro 5, nos encontramos con que:

- El campesino se encuentra en un punto eficiente; es decir, a través de la simple recombinación de las alternativas productivas no se puede mejorar un objetivo sin sacrificio de otros (uno al menos).
- La maximización del margen bruto es el objetivo más logrado del sistema, pues es el que presenta menos variación con respecto al punto ideal, seguido por la optimización del uso de la mano de obra familiar. Con mayor variación con respecto al óptimo resulta el riesgo económico.

B.4 Evaluación del impacto de algunas acciones de desarrollo.

Las acciones de desarrollo introducidas al sistema consistieron en:

- i. Introducción de nuevas tecnologías al subsistema ganadero existente.
- ii. Introducción de nuevas alternativas de producción ganadera.
- iii. Relajación de restricciones que influyen al sistema ganadero.

En primer lugar, se evaluó el impacto que sobre el grado de cumplimiento de los objetivos tendría la introducción de cambios tecnológicos al sistema actual de producción de carne bovina, dando paso a un Sistema Mejorado de Producción (SMP). Los cambios tecnológicos consistieron en mejorar la eficiencia de pastoreo y de manejo de praderas a través de cercos eléctricos, y haciendo más eficiente el uso de subproductos agrícolas mediante la implementación de sistemas de conservación de alimentos.

En el Cuadro 7 se observan las soluciones eficientes y producciones obtenidas con esta nueva situación.

CUADRO 7. SOLUCIONES EFICIENTES

Soluciones Eficientes	Funciones Objetivo			Variables de Decisión			
	Z ₁ Margen Bruto (M\$)	Z ₂ Riesgo (M\$)	Z ₃ Mano de Obra (hrs.)	X ₁ Remolachas Azucarera (ha)	X ₂ Trigo (ha)	X ₃ Frejoles (ha)	X ₄ Ganado de Carne Mejorado (ha)
A	1,950.89	1,952.26	4,274.64	2.33	0.50	3.64	7.32
B	1,947.00	1,951.04	4,210.29	2.06	0.50	4.24	7.00
C	1,842.25	1,181.01	2,849.32	1.00	4.03	2.33	6.44
D	1,875.40	1,277.34	3,242.27	1.00	2.78	3.85	6.18
E	1,963.64	2,759.11	4,541.18	3.45	0.50	1.16	8.69

El vector dado por los valores subrayados constituye el vector ideal, o sea el punto en el cual todos los objetivos adquieren su valor óptimo.

Al margen del resultado, este ejercicio permite demostrar la utilidad de la modelización matemática multiobjetivo como método de análisis de sistemas, pues en un tiempo mucho menor al ocupado por otras formas de evaluación (módulos experimentales, por ejemplo), es posible obtener respuestas racionales y confiables, que permitan al centro decisor racionalizar la distribución de recursos en los sectores rurales.

En el campo de las variables de decisión, al comparar los resultados de los Cuadros 5 y 7 se hace evidente que cuando se mejora la rentabilidad del sector ganadero existe una tendencia de incrementar el número de hectáreas dedicadas a él, a expensas de las destinadas a remolachas y frejoles. Se observa, además, una tendencia a la disminución en el margen bruto junto a una leve disminución del riesgo económico, y se ajustan en mejor forma los requerimientos de mano de obra con la disponibilidad familiar.

En segundo lugar, se realizó una evaluación de la incorporación de una de las recomendaciones entregadas por el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) para los pequeños productores de la zona, consistente en un módulo de producción lechera estacional a pastoreo, como alternativa de reemplazo de la producción de carne.

En el Cuadro 8 se muestran las modificaciones alcanzadas tanto en las variables de decisión como en los objetivos, cuando se incorpora el módulo lechero.

CUADRO 8. SOLUCIONES EFICIENTES

Soluciones Eficientes	Funciones Objetivo			Variables de Decisión			
	Z ₁ Margen Bruto (M\$)	Z ₂ Riesgo (M\$)	Z ₃ Mano de Obra (hrs.)	X ₁ Remolacha Azucarera (ha)	X ₂ Trigo (ha)	X ₃ Frejoles (ha)	X ₄ Ganado de Leche (ha)
A	1,727.87	1,841.97	4,160.03	1.51	0.50	3.95	7.83
B	1,708.47	2,110.47	4,325.12	2.16	0.50	2.32	8.82
C	1,683.90	2,743.86	4,534.11	2.99	0.50	0.25	10.06
D	1,638.00	1,408.66	3,054.08	1.00	3.63	1.30	7.87
E	1,703.80	1,546.62	3,663.38	1.00	1.67	3.76	7.36
F	1,743.24	1,814.60	4,029.29	1.00	0.50	5.24	7.06

El vector dado por los valores subrayados es el vector ideal, o sea el punto en el cual todos los objetivos adquieren su valor óptimo.

Al comparar los vectores de este conjunto eficiente con respecto al generado en el Módulo 1 (Cuadro 5), observamos que, en el campo de los objetivos se produce una disminución del margen bruto y un aumento del riesgo económico al reemplazar la producción de carne bovina campesina por el módulo lechero del INIA, obteniéndose, a la vez, un mejor ajuste entre la disponibilidad y requerimientos de mano de obra familiar.

En el campo de las variables, comparando los mismos conjuntos de soluciones no dominadas, se observa que la alternativa INIA obtiene un mayor número de hectáreas que la alternativa de producción de carne realizada por los campesinos.

Finalmente, se realizó una evaluación del impacto obtenido cuando se relajan algunas de las restricciones que afectan a los objetivos del centro decisor. Veamos:

Una de las principales limitaciones que tiene la pequeña agricultura es la disponibilidad de capital para la inversión en sus actividades productivas. Esto se explica, en parte, por los graves problemas de comercialización de sus productos y una deficiente política crediticia, no acorde con las reales necesidades, de capital de los campesinos.

Por esta razón, en el modelo general se reemplazó el valor del capital disponible. El Cuadro 9 muestra el efecto de esta modificación en el campo de los objetivos.

CUADRO 9. SOLUCIONES EFICIENTES

Soluciones Eficientes	Funciones Objetivo			Variables de Decisión			
	Z ₁ Margen Bruto (M\$)	Z ₂ Riesgo (M\$)	Z ₃ Mano de Obra (hrs.)	X ₁ Remolacha Azucarera (ha)	X ₂ Trigo (ha)	X ₃ Frejoles (ha)	X ₄ Ganado de Came (ha)
A	<u>2.677,05</u>	2.649,42	<u>5.290,15</u>	3,45	0,50	8,81	1,04
B	2.641,82	2.337,65	4.827,34	3,45	1,95	7,17	1,23
C	2.436,40	776,40	2.392,27	1,04	8,00	4,61	0,15
D	2.428,09	<u>775,33</u>	2.385,80	1,03	7,97	4,58	0,21

El vector dado por los valores subrayados constituye el vector ideal, o sea el punto en el cual todos los objetivos adquieren su valor óptimo.

La respuesta del objetivo margen bruto, originada en un incremento del capital, es de particular interés, ya que se produce un incremento en el número de hectáreas de los cultivos más rentables, pero cuyos costos son relativamente más altos.

Con respecto al ganado, se comprueba que su importancia en superficie va disminuyendo a medida que el sistema posee un mayor capital de trabajo.

Revisando el grado de conflicto entre los objetivos, se observa que el margen bruto óptimo y la optimización de la mano de obra se complementan notablemente, mientras que se mantiene el conflicto entre éstos con el riesgo económico.

De acuerdo a los resultados obtenidos, podemos concluir lo siguiente:

- De los tres objetivos planteados por los campesinos, la maximización del Margen Bruto es el más logrado por ellos.
- Si desea aumentar el Margen Bruto generado y optimizar el ajuste entre los requerimientos y la disponibilidad de mano de obra de origen familiar, el centro decisor (campesino), deberá maximizar las hectáreas dedicadas a remolachas y aumentar, aunque en menor grado, el número de hectáreas para el frejol. En cambio, si su prioridad es la minimización del riesgo económico, deberá aumentar las hectáreas dedicadas a trigo.
- La utilización de mano de obra de origen familiar no sobrepasa, en ninguna de las soluciones planteadas por el modelo, la disponibilidad que de ella tiene la unidad productiva para cada período definido. Cabe destacar que lo prolongado de estos períodos encubre, quizás, un déficit de mano de obra familiar en determinados puntos del ciclo agrícola. Por ello para lograr una mayor precisión en los resultados, sería importante buscar metodologías que permitan representar el flujo real de mano de obra a través del año.
- Acerca del grado de conflictividad entre los objetivos, se concluye que existe un claro conflicto entre la maximización del Margen Bruto y el Riesgo Económico del plan productivo, siendo más flexible la relación de ambos con la optimización del uso de la mano de obra familiar.

- Respecto a la introducción de una innovación tecnológica rentable en el proceso pecuario, hay que señalar que no se traduce en un mejoramiento del Margen Bruto predial.
- Un aumento del capital disponible para la producción mejora los valores de los objetivos planteados por los campesinos. El módulo lechero sólo ingresa al modelo a través del ajuste entre requerimientos y disponibilidad de mano de obra familiar.

4.2 SEGUNDA APLICACIÓN: MODELO INTERACTIVO STEP (BINELLI, 1991)

A. Material y método

Este trabajo se realizó en la Cooperativa Campesina Chacayal de Los Angeles, Provincia del Bío-Bío, VIII Región, Chile. La cooperativa, creada en 1966, cuenta en la actualidad con 216 socios, divididos en tres estratos según el tamaño del predio. (trabajo realizado por el Servicio Evangélico para el Desarrollo (SEPADE). En el Cuadro 10, se resume la información del número de socios para cada uno de los estratos.

CUADRO 10. TOTAL DE SOCIOS SEGUN ESTRATO

Estrato	Superf. (ha)	Nº Socios	% Estrato
1	0 - 5	127	58.8
2	5 - 15	64	29.6
3	15 y más	25	11.6
Total		216	100.0

Fuente: Elaboración propia según datos obtenidos en los registros de la administración de la Cooperativa, basados en el trabajo realizado por SEPADE (1986).

Para este estudio en particular, se seleccionó al azar una muestra de cinco productores del tercer estrato, que corresponden al 20% de éste. Los productores seleccionados comparten las siguientes características:

- poseen entre 30 y 50 ha. físicas.
- producen casi exclusivamente para el mercado;
- contratan mano de obra permanente; y
- cuentan con asesoría técnica y acceso al crédito.

Este grupo de agricultores, según Bengoa et al. (1984), pertenece al de los campesinos que tienen posibilidades de capitalización; por lo tanto, se transformarían, al mediano plazo, en pequeños empresarios agrícolas.

El trabajo se dividió en dos etapas: La primera consistió en la recolección de datos. Para este efecto se diseñó una encuesta-entrevista, que se llevó a cabo con los productores seleccionados, entre abril y junio de 1989. En ese período se

hicieron tres visitas, una por mes, considerando que la primera permitió la selección de la muestra y la prueba del instrumento. En las dos visitas siguientes se realizó la encuesta, para obtener la información necesaria para la construcción del modelo matemático. Los datos requeridos para la formulación de éste fueron:

- objetivos de los productores;
- alternativas productivas;
- técnicas de producción de cada alternativa presente.

Una vez recolectada la información necesaria, se procedió a su estructuración en fichas técnicas por rubro. Además de los datos obtenidos con la encuesta, se utilizaron como fuentes complementarias, la Revista del Campo del diario El Mercurio, publicaciones periódicas de la Dirección de Estudios y Presupuesto (DEP) y el Boletín Pecuario de la Sociedad Nacional de Agricultura (SNA). Esto permitió la conformación de una base de datos con la información, por cada rubro considerado a lo largo de un período de diez años.

Estos antecedentes permitieron iniciar la segunda fase, que comprendió la formulación del modelo, utilizando para ello el método STEP, descrito por Benayoun et al. en 1971. Este tiene la particularidad de generar una interacción entre el campesino (centro decisor) y el analista, que le presenta la solución entregada por el modelo para que el campesino decida si se ajusta o no a sus expectativas.

Una vez precisadas las alternativas productivas a incluir en el modelo, se procedió a definir su expresión matemática.

Para incorporar al modelo la producción de bovinos de carne, hubo que realizar una serie de pasos previos. Primero, fue necesario efectuar un desarrollo de masa y, a partir de éste, determinar los requerimientos nutricionales de los animales. Tanto los requerimientos, como la disponibilidad de forraje del sistema, se expresaron como Unidades Forrajeras^{10/}. Una vez realizado este paso, se obtuvieron los costos variables, ingresos y el margen bruto generado por el rubro pecuario, expresado como kilogramos de carne producidos por hectárea.

B. Resultados y discusión

B.1 Estructura teórica del modelo

Las variables de decisión definidas fueron:

- X_1 : Cantidad de hectáreas dedicadas a avena grano
- X_2 : Cantidad de hectáreas dedicadas a cebada
- X_3 : Cantidad de hectáreas dedicadas a frejol
- X_4 : Cantidad de hectáreas dedicadas a remolacha
- X_5 : Cantidad de hectáreas dedicadas a trigo
- X_6 : Cantidad de hectáreas dedicadas a la producción de carne bovina

En el Cuadro 11 se presenta la estructura del modelo interactivo de programación

10/ UF: el valor energético de los alimentos, se relaciona con la cebada de calidad medida, que contiene un 86% de M.S.; por definición un kilo de esta cebada, corresponde a una Unidad Forrajera (INRA, 1984).

multicriterio para el sistema de producción anteriormente descrito. La primera restricción corresponde a superficie máxima del predio y la segunda representa una restricción de riego. La tercera y cuarta son restricciones agronómicas (exigencias de rotación). La quinta es una restricción para el cultivo de remolacha dada por IANSA, que establece en los contratos como superficie mínima una hectárea física. La sexta es una restricción que dice relación con el capital disponible para la realización de un ciclo agrícola. Las restricciones 7 a 16 son producto del uso del modelo de Hazell (1971) para medir el riesgo económico de la explotación. Los dos objetivos considerados en el presente trabajo fueron la maximización del margen bruto y la minimización del riesgo económico.

CUADRO 11. MODELO ESTRUCTURAL METODO STEP

Funciones objetivos:

$$\text{Max. } Z_1 : MB_1 X_1 + MB_2 X_2 + MB_3 X_3 + MB_4 X_4 + MB_5 X_5 + MB_6 X_6$$

$$\text{Min. } Z_2 : X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20} \\ + X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{24} + X_{25} + X_{26}$$

Sujeto a:

$$X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 = S$$

$$X_3 + X_4 + 0.2 X_6 \leq SR$$

$$X_4 \geq Sr/3$$

$$X_5 \geq St/2$$

$$X_4 \geq N$$

$$C_1 X_1 + C_2 X_2 + C_3 X_3 + C_4 X_4 + C_5 X_5 + C_6 X_6 \leq K$$

$$(MB_1 X_1 - MB^*_1 X_1) + (MB_1 X_2 - MB^*_2 X_2) + (MB_1 X_3 - MB^*_3 X_3) + (MB_1 X_4 - MB^*_4 X_4) \\ + (MB_1 X_5 - MB^*_5 X_5) + (MB_1 X_6 - MB^*_6 X_6) + X_7 - X_8 = 0$$

$$(MB_2 X_1 - MB^*_1 X_1) + (MB_2 X_2 - MB^*_2 X_2) + (MB_2 X_3 - MB^*_3 X_3) + (MB_2 X_4 - MB^*_4 X_4) \\ + (MB_2 X_5 - MB^*_5 X_5) + (MB_2 X_6 - MB^*_6 X_6) + X_9 - X_{10} = 0$$

$$(MB_3 X_1 - MB^*_1 X_1) + (MB_3 X_2 - MB^*_2 X_2) + (MB_3 X_3 - MB^*_3 X_3) + (MB_3 X_4 - MB^*_4 X_4) \\ + (MB_3 X_5 - MB^*_5 X_5) + (MB_3 X_6 - MB^*_6 X_6) + X_{11} - X_{12} = 0$$

$$(MB_4 X_1 - MB^*_1 X_1) + (MB_4 X_2 - MB^*_2 X_2) + (MB_4 X_3 - MB^*_3 X_3) + (MB_4 X_4 - MB^*_4 X_4) \\ + (MB_4 X_5 - MB^*_5 X_5) + (MB_4 X_6 - MB^*_6 X_6) + X_{13} - X_{14} = 0$$

$$(MB_5 X_1 - MB^*_1 X_1) + (MB_5 X_2 - MB^*_2 X_2) + (MB_5 X_3 - MB^*_3 X_3) + (MB_5 X_4 - MB^*_4 X_4) + (MB_5 X_5 - MB^*_5 X_5) + (MB_5 X_6 - MB^*_6 X_6) + X_{15} - X_{16} = 0$$

$$(MB_6 X_1 - MB^*_1 X_1) + (MB_6 X_2 - MB^*_2 X_2) + (MB_6 X_3 - MB^*_3 X_3) + (MB_6 X_4 - MB^*_4 X_4) + (MB_6 X_5 - MB^*_5 X_5) + (MB_6 X_6 - MB^*_6 X_6) + X_{17} - X_{18} = 0$$

$$(MB_7 X_1 - MB^*_1 X_1) + (MB_7 X_2 - MB^*_2 X_2) + (MB_7 X_3 - MB^*_3 X_3) + (MB_7 X_4 - MB^*_4 X_4) + (MB_7 X_5 - MB^*_5 X_5) + (MB_7 X_6 - MB^*_6 X_6) + X_{19} - X_{20} = 0$$

$$(MB_8 X_1 - MB^*_1 X_1) + (MB_8 X_2 - MB^*_2 X_2) + (MB_8 X_3 - MB^*_3 X_3) + (MB_8 X_4 - MB^*_4 X_4) + (MB_8 X_5 - MB^*_5 X_5) + (MB_8 X_6 - MB^*_6 X_6) + X_{21} - X_{22} = 0$$

$$(MB_9 X_1 - MB^*_1 X_1) + (MB_9 X_2 - MB^*_2 X_2) + (MB_9 X_3 - MB^*_3 X_3) + (MB_9 X_4 - MB^*_4 X_4) + (MB_9 X_5 - MB^*_5 X_5) + (MB_9 X_6 - MB^*_6 X_6) + X_{23} - X_{24} = 0$$

$$(MB_{10} X_1 - MB^*_1 X_1) + (MB_{10} X_2 - MB^*_2 X_2) + (MB_{10} X_3 - MB^*_3 X_3) + (MB_{10} X_4 - MB^*_4 X_4) + (MB_{10} X_5 - MB^*_5 X_5) + (MB_{10} X_6 - MB^*_6 X_6) + X_{25} - X_{26} = 0$$

B.2 Especificación del modelo

Como ya se dijo consiste en dar valores a los coeficientes de las variables de decisión, restricciones y objetivos del modelo estructural, a partir de la información recopilada en las encuestas y ordenadas en las fichas técnicas y de costos.

La especificación del modelo estructural da origen al modelo operativo en el que se pueden observar el valor de los objetivos y de las restricciones, además de los coeficientes de las variables de decisión. En el Cuadro 12 se muestra el modelo operativo.

Todos los datos de costos y márgenes brutos fueron actualizados a abril de 1989 para hacerlos comparables.

CUADRO Nº 12. MODELO OPERATIVO

Alternativas productivas											Variables de Desviación del Riesgo Económico																SIGNIFICADO		
X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₅	X ₂₆				
4,665	(1,482)	(20,346)	(135,163)	(42,678)	29,882	1	-1																				= 0	Riesgo Año 1	
(6,071)	(3,776)	(38,011)	(180,760)	(54,918)	5,627	1	-1																				= 0	Riesgo Año 2	
(17,570)	(10,528)	(47,235)	(141,977)	50,416	(39,488)			1	-1																		= 0	Riesgo Año 3	
(8,167)	(7,441)	(33,985)	16,666	(14,076)	(35,390)					1	-1																= 0	Riesgo Año 4	
(13,010)	(9,147)	30,963	10,071	(3,481)	8,158)						1	-1															= 0	Riesgo Año 5	
(22,703)	(5,934)	(64,440)	127,414	36,744	402											1	-1										= 0	Riesgo Año 6	
(21,615)	515	(39,772)	167,235	90,966	9,630												1	-1									= 0	Riesgo Año 7	
59,445	46,207	(3,460)	101,011	4,140	21,101														1	-1							= 0	Riesgo Año 8	
12,323	(4,369)	(133,793)	10,778	(16,044)	9,934															1	-1						= 0	Riesgo Año 9	
22,034	(4,045)	82,493	24,724	(21,067)	6,459																						= 0	Riesgo Año 10	
1	1	1	1	1	1																						= 40	Sup. total (ha)	
		1	1	1	0.2																						≤ 11	Sup. máx. riego (ha)	
			1	1																							≥ 1	Sup. mín. remolacha (ha)	
			1	1																							≤ 13.3	Sup. máx. remolacha (ha)	
71,429	98,545	74,532	(*)	85,145	21,014																						≤ 20.0	Sup. máx. trigo (ha)	
					1																						≤ 2 mill.	Capital disponible (\$)	
86,071	65,055	233,133	189,995	184,855	114,510																						Z ₁ Máx	Margen Bruto \$	
						1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		Z ₂ Min	Riesgo Económico

Los costos de producción de la remolacha no son incorporados en el modelo, por ser ellos solventados por IANSA en forma de crédito pagadero a la cosecha.

B.3 Resultados de la aplicación del modelo

Una vez definidos los modelos estructural y operativo, se procedió a construir la matriz de intercambios (pay-off matrix). Para ello se utilizó el programa computacional "Super Lindo" (Linear Interactive and Discrete Optimizer).

La matriz se generó a partir de la optimización por separado de cada uno de los objetivos definidos en el modelo; así se obtuvo el valor ideal y el mínimo para cada uno de ellos. En el Cuadro 13 se aprecia el resultado de la matriz.

CUADRO 13. MATRIZ DE INTERCAMBIOS PARA AMBOS OBJETIVOS

	Margen bruto (Z ₁)	Riesgo económico (Z ₂)
Margen bruto (Z ₁)	6,682,922	15,629,073
Riesgo económico (Z ₂)	5,107,972	4,834,394

Los valores de la matriz están expresados en pesos (\$)

En la primera columna aparecen los valores máximo y mínimo para Z₁, lo mismo ocurre en la segunda columna para Z₂.

Los valores de la diagonal de la matriz determinan el vector ideal, por definición inalcanzable al tratarse de objetivos en conflicto, pero que tiene importancia como punto de referencia para el centro decisor. El vector ideal en este caso es:

$$\text{VECTOR IDEAL} = (Z_1 \ 6,682,922; Z_2 \ 4,834,394)$$

Como se señaló en el capítulo anterior, los métodos interactivos tienen la particularidad de exigir una interacción entre el analista y el centro decisor. Asumen además, que el decisor en su elección optará por aquella alternativa más cercana a su punto ideal.

Una vez formulada la matriz, se resolvió el siguiente programa lineal para obtener la solución óptima, dadas las características del sistema productivo en estudio.

Función objetivo Min d

Sujeto a :

$$\pi_1 (6,682,922 - 86,071 * X_1 - 65,055 * X_2 - 233,133 * X_3 - 189,955 * X_4 - 184,855 * X_5 - 114,510 * X_6) \leq d$$

$$\pi_2 (X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20} + X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{24} + X_{25} + X_{26} - 4,834,394) \leq d$$

$$x \in F$$

Donde: π_j : Representa el peso normalizado para cada objetivo.

d : Corresponde a la distancia menor entre la solución ideal y el óptimo buscado (para los efectos del programa, d se denominará X_{27}).

El Método STEP define dichos pesos como:

$$\pi_j = \frac{\beta_j}{\sum_{j=1}^2 \beta_j}$$

El coeficiente β_j en este caso es:

$$\beta_1 = \frac{6,682,922 - 5,107,972}{6,682,922} * \frac{1}{\sqrt{86,071^2 + 65,055^2 + 233,133^2 + 189,995^2 + 184,855^2 + 114,510^2}}$$

$$\beta_2 = \frac{15,629,073 - 4,834,394}{15,629,073} * \frac{1}{\sqrt{20}}$$

Donde : $\beta_1 = 6.1 \times 10^{-7}$

$\beta_2 = 1.5 \times 10^{-1}$

A partir de estos valores de β_j se obtienen:

$$\beta_1 + \beta_2 = 0,1544$$

$$\pi_1 = \frac{6.1 \times 10^{-7}}{0.1544} = 3.95 \times 10^{-6} ; \quad \pi_2 = \frac{1.5 \times 10^{-1}}{0.1544} = 9.7 \times 10^{-1}$$

Esta particular forma de normalización de los pesos de cada objetivo, utilizado por el método STEP, es caracterizada por Rehman y Romero (1987) del siguiente modo:

Primero, los pesos normalizados no representan necesariamente las preferencias del centro decisor. Segundo, el proceso de normalización asume que los coeficientes π_j suman uno, como una necesidad práctica para poder comparar alternativas. Tercero, los primeros términos de los valores β_j otorgan un mayor peso a los objetivos, los cuales se desvían de manera significativa de la solución óptima.

Finalmente, el propósito de los segundos términos de los valores β_j , es normalizar los objetivos empleando la distancia Euclidiana.

Una vez obtenidos los valores de π_1 y π_2 , fueron reemplazados en las restricciones como se aprecia a continuación.

Función objetivo: Min X_{27}

Sujeto a:

$$26.4 - 0.3*X_1 - 0.3*X_2 - 0.9*X_3 - 0.8*X_4 - 0.7*X_5 - 0.5*X_6 \leq X_{27}$$

$$0.99999*X_7 + 0.99999*X_8 + 0.99999*X_9 + 0.99999*X_{10} + 0.99999*X_{11} + 0.99999*X_{12} + 0.99999*X_{13} + 0.99999*X_{14} + 0.99999*X_{15} + 0.99999*X_{16} + 0.99999*X_{17} + 0.99999*X_{18} + 0.99999*X_{19} + 0.99999*X_{20} + 0.99999*X_{21} + 0.99999*X_{22} + 0.99999*X_{23} + 0.99999*X_{24} + 0.99999*X_{25} + 0.99999*X_{26} - 4,834,375 \leq X_{27}$$

$x \in F$

Reemplazando los valores del modelo, las restricciones quedan de la siguiente forma:

$$0.3*X_1 + 0.3*X_2 + 0.9*X_3 + 0.8*X_4 + 0.7*X_5 + 0.5*X_6 + X_{27} \geq 26.4$$

$$0.99999*X_7 + 0.99999*X_8 + 0.99999*X_9 + 0.99999*X_{10} + 0.99999*X_{11} + 0.99999*X_{12} + 0.99999*X_{13} + 0.99999*X_{14} + 0.99999*X_{15} + 0.99999*X_{16} + 0.99999*X_{17} + 0.99999*X_{18} + 0.99999*X_{19} + 0.99999*X_{20} + 0.99999*X_{21} + 0.99999*X_{22} + 0.99999*X_{23} + 0.99999*X_{24} + 0.99999*X_{25} + 0.99999*X_{26} - X_{27} \geq 4,834,375$$

$x \in F$

El resultado en el campo de los objetivos entregados por el programa, a partir de las alternativas existentes en el sistema en estudio, está representada por el siguiente vector:

VECTOR SOLUCIÓN ITERACIÓN 1 = (Z_1 6,614,355; Z_2 14,809,962)

Un análisis comparativo entre la solución de la primera iteración y el valor ideal de ambos objetivos, indica que el modelo le asignó, dada la combinación de variables de decisión entregada, una mayor importancia relativa al margen bruto. Esto se refleja claramente en la escasa diferencia entre el valor alcanzado por este objetivo en la solución óptima y su ideal. Además, el valor del riesgo económico en la primera solución es muy cercano al punto de riesgo máximo del sistema productivo. En este contexto la posibilidad de mejorar la rentabilidad del predio es baja, dado que el rango de movilidad del programa dentro de la frontera eficiente es escasa.

Una vez obtenida la solución óptima, el método STEP requiere la información del centro decisor, en términos del grado de satisfacción que dicha alternativa le entrega. Ello exige que el centro decisor tenga cierta noción de los intercambios entre ambos objetivos. En el caso particular de este estudio, fue el nivel gerencial de Confederación Nacional de

Cooperativas Campesinas (CAMPOCOOP) quien actuó como decisor^{11/}.

Frente al resultado arrojado por el modelo, que muestra que el objetivo margen bruto se encuentra muy cerca de su ideal, mientras el riesgo se encuentra cerca de su peor valor (valor nadir), el centro decisor manifestó su disposición a sacrificar el margen bruto con el fin de lograr una disminución del riesgo económico. El sacrificio definido para Z_1 es de \$ 614,355 alcanzando así un valor de \$ 6.0 millones. El vector solución para este programa es el siguiente:

VECTOR SOLUCIÓN ITERACIÓN 2 = (Z_1 6,000,000; Z_2 14,697,992)

En la misma perspectiva, dado que el resultado alcanzado en términos del riesgo económico, no es sustantivamente mejor que la primera interacción, se busca una segunda alternativa en la cual se disminuye Z_1 , en \$ 1,114,355 con respecto a la solución primera y por lo tanto queda en \$ 5.5 millones. El vector que recoge este resultado es:

VECTOR SOLUCIÓN ITERACIÓN 3 = (Z_1 5,500,000; Z_2 12,808,224)

Al llegar a este punto, el centro decisor manifestó su satisfacción con la solución y por ende el programa interactivo se detiene transformándose esta última en la solución óptima.

El Cuadro 14 resume el conjunto de soluciones anteriormente presentado, tanto en el campo de los objetivos como en el de las variables de decisión.

CUADRO 14. COMPARACIÓN Y RESUMEN DE SOLUCIONES MODELO INTERACTIVO STEP

Soluciones Efilientes	Funciones objetivo		Variables de decisión						Empleo JH ⁺
	Z_1 Margen Bruto (M\$)	Z_2 Riesgo (M\$)	X_1 Avena (ha)	X_2 Cebada (ha)	X_3 Frejol (ha)	X_4 Remolacha (ha)	X_5 Trigo (ha)	X_6 Carne Bovina (ha)	
Iteración 1	6,614,355	14,809,962	0.0	0.0	1.8	6.6	18.8	12.8	697
Iteración 2	6,000,000	14,697,992	0.7	4.7	0.3	8.4	14.4	11.5	794
Iteración 3	5,500,000	12,808,224	0.1	7.7	0.0	6.9	11.0	14.3	687
Módulo real*	5,290,000	12,200,000	1.0	3.0	4.0	5.0	8.0	19.0	712
Ideal R.E.**	5,107,972	4,834,394	0.0	15.2	0.0	1.0	0.0	23.8	280
Ideal M.B.***	6,682,922	15,629,073	0.0	0.0	0.8	7.9	20.0	11.3	763

*: Obtenido a partir de los promedios en ha. de cada rubro del total de campesinos seleccionados en la muestra

** : Riesgo Económico

***: Margen Bruto

+ : Jornadas Hombre

11/ Varias razones justifican esta decisión: primero, como entidad de apoyo técnico de sus asociados, muestra gran interés por mejorar los niveles productivos de éstos; segundo, su larga experiencia en el trabajo con pequeños productores legitima su opinión como centro decisor; tercero, entiende que la gestión empresarial es una de las principales limitantes del sector campesino, demostrando su preocupación en la búsqueda de nuevas metodologías de apoyo enfocadas en esta dirección.

En general, las soluciones obtenidas, analizadas desde la perspectiva del grado de cumplimiento de los objetivos, reafirman la validez de la modelización como metodología optimizadora en un contexto restrictivo, como es el caso de las economías campesinas. Por otra parte, se constata que los campesinos se ubican en la frontera eficiente, lo que refleja un nivel de gestión bastante bueno a partir de sus recursos y restricciones.

Con respecto a las iteraciones 2 y 3, los niveles de riesgo alcanzados están lejos de su ideal, lo que no ocurre para Z_1 , elemento indicativo de que el programa le asigna un peso mayor a este objetivo. La solución 3, en un punto de gran pendiente reflejado en que la disminución de Z_1 , generó una importante mejoría en Z_2 .

El empleo requerido se mantiene en niveles similares, y la mayor demanda se encuentra en la segunda iteración con 794 jornadas/hombre. Como elemento a ser considerado por el centro decisor en sus opciones, se esperaría que éste elija aquella solución que satisfaga sus requerimientos en término de sus objetivos, sin perder de vista lo que ocurre a nivel de exigencia de mano de obra.

Revisados los resultados en términos de las variables de decisión o rubros incorporados al modelo, se pueden plantear diferentes interpretaciones.

Primero, la avena y la cebada son rubros incorporados por el programa sólo en aquellas soluciones que persiguen una disminución del riesgo. Es así como aparecen en la segunda y tercera iteración en niveles relativamente pequeños, salvo la cebada que llega a las 7.7 hectáreas en la iteración 3.

Segundo, el frejol, pese a ser la alternativa más rentable, aparece escasamente representado. La razón puede estar dada por las restricciones de riego y capital, ya que es un cultivo exigente en ambos recursos.

Tercero, la remolacha mantiene una participación cercana a las siete hectáreas en todas las soluciones. Siendo un cultivo rentable, pero riesgoso, a diferencia del frejol, no tiene restricción de capital por ser éste aportado por IANSA.

Cuarto, tanto el trigo como los bovinos son los rubros que ocupan las mayores superficies. Los une el hecho de tener margen bruto, riesgo y costos de producción intermedios, comparados con las otras alternativas.

B.4 Acciones de Desarrollo

Para evaluar el impacto de las diferentes acciones de desarrollo se incorporaron al sistema las alternativas priorizadas por el centro decisor, en función de tres criterios: primero, que mejoren el nivel de satisfacción del objetivo margen bruto, esto es, que aumenten la rentabilidad del sistema productivo y, con ello, los niveles de vida de los campesinos; el segundo, dice relación con el impacto local y su potencial efecto multiplicador en el resto de la comunidad; y el tercero, con la accesibilidad a estas alternativas por parte de los productores. Concretamente se consideraron los programas de Fomento al Riego, Transferencia Tecnológica y el Programa de Asistencia Crediticia del Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP)^{12/} por ser coincidentes con las necesidades de los pequeños productores.

12/ INDAP, 1991a, b, c. Servicio dependiente del Ministerio de Agricultura.

En esa perspectiva, las acciones de desarrollo evaluadas fueron:

i) Acciones de transferencia tecnológica destinadas a la introducción de nuevas alternativas productivas, que permitan mejorar los ingresos del grupo familiar. En este trabajo se utilizó como nueva alternativa la zanahoria, dado que las características agroecológicas, las condiciones del mercado local e internacional, los conocimientos adquiridos por los campesinos a través de los programas de transferencia tecnológica del Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP) y los estudios del INIA para la zona, así lo recomendaban.

ii) Acciones de desarrollo que implican la puesta en riego del total de la superficie cultivable.

A pesar de ser una zona con precipitaciones abundantes (1.280 mm. anuales), la disponibilidad de agua es una de las principales limitantes de los sistemas productivos campesinos. Por ello se consideró relevante introducir en el modelo la puesta en riego de la superficie de secano arable, con el fin de posibilitar la introducción de cultivos de mayor rentabilidad. El mecanismo existente para el fomento del riego, son los concursos definidos por Decreto Ley 18.450. En la actualidad, vía convenio INDAP - Fondo de Solidaridad e Inversión Social (FOSIS), fueron modificadas las bases del subsidio al riego, posibilitando el acceso a los mismos por parte de los pequeños productores.

iii) Acciones de apoyo crediticio destinadas a incrementar el capital de operación de las explotaciones.

El capital de operación de las economías campesinas, al igual que el de inversión, son limitantes importantes para su desarrollo. Es materia de pleno consenso que cualquier estrategia hacia el sector campesino que busque su modernización pasa, entre otros factores, por aumentar la disponibilidad de los recursos crediticios y mejorar los mecanismos de asignación de éstos. En esta perspectiva INDAP, que es la principal institución estatal preocupada de la pequeña agricultura, tiene un rol fundamental que jugar a través de sus programas de asistencia crediticia, de transferencia tecnológica y de desarrollo rural.

Evaluar el impacto de cada una de las alternativas, significó, primero, construir la matriz de intercambios (Pay-Off Matrix), para luego desarrollar el método STEP y así obtener el óptimo, dada las nuevas condiciones incorporadas al modelo original.

Introducción de la zanahoria como nueva alternativa productiva

Para realizar ésto en términos matemáticos, como ya se dijo, se incorporó al modelo original la zanahoria como una séptima alternativa productiva (X_7), con su correspondiente margen bruto. Además, fue preciso modificar las restricciones de riego, capital y superficie total, cuando se introdujo esta nueva variable de decisión. En el Cuadro 15, se puede apreciar la matriz que señala los valores máximo y mínimo de ambos objetivos.

CUADRO 15. MATRIZ DE INTERCAMBIOS PARA AMBOS OBJETIVOS, ALTERNATIVA ZANAHORIA

	Margen bruto (Z_1)	Riesgo económico (Z_2)
Margen bruto (Z_1)	8,747,586	18,514,708
Riesgo económico (Z_2)	5,107,972	4,834,394

Los valores de la Matriz están expresados en pesos (\$)

Con los datos contenidos en la matriz, se siguieron los pasos indicados por el método STEP para obtener la primera iteración dadas las modificaciones realizadas al modelo original. El siguiente vector recoge la solución alcanzada para la alternativa que incorpora la zanahoria.

VECTOR SOLUCIÓN ITERACIÓN (ZANAHORIA) = (Z_1 7,139,088; Z_2 14,383,627)

El resultado obtenido es superior en el margen bruto y peor en el riesgo económico al óptimo alcanzado en la situación "sin acciones de desarrollo". Al presentar esta situación al centro decisor, éste expresó interés en buscar una solución que dominara al óptimo anterior (sin acciones de desarrollo) en virtud de lo cual se sacrificó el margen bruto en \$ 339,088. El vector que recoge esta situación es:

VECTOR SOLUCIÓN ITERACIÓN 2 (ZANAHORIA) = (Z_1 6,800,000; Z_2 13,076,845)

Como se aprecia el sacrificio del margen bruto mejoró el resultado del riesgo económico, el cual, sin embargo, sigue siendo mayor que en la solución óptima. Por esta razón, el centro decisor estimó necesario una tercera iteración que sacrifique el margen bruto en \$ 100,000 más. El siguiente vector recoge esta nueva solución.

VECTOR SOLUCIÓN ITERACIÓN 3 (ZANAHORIA) = (Z_1 6,700,000; Z_2 12,387,569)

Al analizar esta nueva solución se constata, en primer término, que una disminución de Z_1 en \$ 439,088 generó una mejora en Z_2 de \$ 1,996,058. El intercambio de objetivos en esta zona del conjunto eficiente es más favorable que en la iteración anterior, ya que por cada unidad sacrificada del margen bruto el riesgo económico disminuyó en 4.5 unidades. En segundo término, esta solución domina a la solución óptima en el caso sin intervención, lo cual se traduce en la aceptación de ésta como solución óptima para el centro decisor.

En el Cuadro 16 se presenta el resumen de las soluciones, en términos de los valores que toman los objetivos y las variables de decisión.

CUADRO 16. RESUMEN DE SOLUCIONES MODELO INTERACTIVO STEP, ALTERNATIVA ZANAHORIA

Soluciones Eficientes	Funciones objetivo		Variables de decisión							Empleo
	Z ₁ Margen Bruto (M\$)	Z ₂ Riesgo (M\$)	X ₁ Avena (ha)	X ₂ Cebada (ha)	X ₃ Frejol (ha)	X ₄ Remolacha (ha)	X ₅ Trigo (ha)	X ₆ Carné Bovina (ha)	X ₇ Zanahoria (ha)	JH ⁺
Optimo*	5,500,000	12,808,224	0.1	7.7	0.0	6.9	11.0	14.3		687
Iteración 1	7,139,088	14,383,672	0.0	0.0	0.0	2.6	13.1	23.0	1.3	495
Iteración 2	6,800,000	13,076,845	0.0	0.0	4.4	1.8	12.2	21.0	0.6	490
Iteración 3	6,700,000	12,387,569	0.0	0.0	5.1	1.0	11.6	21.7	0.5	443

*: acciones de desarrollo

+: jornadas hombre

En un ámbito más específico y con la introducción de la zanahoria, se puede precisar lo siguiente:

Primero, todas las soluciones incorporan el rubro bovinos de carne en un alto porcentaje (cercano al 50% de la superficie total), a pesar de tener una baja rentabilidad. Probablemente, ello se deba a que tanto el riesgo económico, como las necesidades de capital, alcanzan valores comparativamente mejores que en los otros rubros.

Segundo, la remolacha en las iteraciones 2 y 3, está presente en niveles cercanos al mínimo establecido por la restricción de IANSA (una o más hectáreas cultivadas). A pesar de su buena rentabilidad y que sus costos de producción son financiados por la empresa, el riesgo económico medido a través del modelo de Hazzel (1971) es alto, lo que determina en este caso su baja incorporación. Ello no es así en la primera iteración, que presenta una mayor rentabilidad.

Tercero, el trigo aparece incorporado en todos los casos en superficies importantes.

Cuarto, tanto la avena como la cebada no fueron consideradas por ninguna de las soluciones, posiblemente por sus características de baja rentabilidad y riesgo.

Por último, y sin duda la constatación más relevante, es que la zanahoria permite, en todas las alternativas, una mejora real en los objetivos del campesino, pese a ser incluida en pequeñas superficies. Sin embargo se trata de un cultivo poco intensivo en el uso de mano de obra.

Puesta en riego del total de la superficie arable

La modificación del modelo original para incorporar esta alternativa de desarrollo, consiste en eliminar la restricción de riego, dejando al programa computacional libre para asignar valores mayores a las alternativas productivas que requieren de éste. En el Cuadro 17, se puede apreciar la matriz que recoge los valores máximo y mínimo de ambos objetivos.

**CUADRO 17. MATRIZ DE INTERCAMBIOS PARA AMBOS OBJETIVOS,
ALTERNATIVA RIEGO**

	Margen bruto (Z₁)	Riesgo económico (Z₂)
Margen bruto (Z ₁)	8,739,207	25,334,506
Riesgo económico (Z ₂)	5,117,972	4,834,394

Los valores de la matriz están expresados en pesos (\$)

A partir de esta información, se procedió, conforme a los pasos indicados por el método STEP, a realizar la primera iteración en este nuevo contexto. El siguiente vector recoge la solución para la alternativa que incorpora el riego.

VECTOR SOLUCIÓN ITERACIÓN 1 (RIEGO) = (Z₁ 8,739,207; Z₂ 25,334,506)

Al analizar este vector lo primero que llama la atención es que esta primera iteración entrega el valor ideal para el objetivo margen bruto, y el valor nadir para el objetivo riesgo económico. Esto se explica por la gran variación del objetivo riesgo económico en relación con el margen. Al eliminar el riesgo económico como restricción, el modelo asigna un valor mayor a las alternativas que requieren de éste y son tanto el frejol como la remolacha, los de mayor riesgo económico y rentabilidad.

Los requerimientos de mano de obra en esta combinación son muy altos, alcanzando un valor de 1,866 JH. Esta demanda permitiría mantener a siete personas trabajando durante toda la temporada agrícola, en contraste con la realidad de los productores seleccionados que en promedio ocupan tres jornaleros al año.

Siguiendo el esquema señalado en el acápite anterior, y dado que no se puede mejorar el margen, se iteró buscando disminuir el riesgo de la explotación. A continuación se puede observar el vector de la segunda iteración para la alternativa riego.

VECTOR SOLUCIÓN ITERACIÓN 2 (RIEGO) = (Z₁ 8,000,000; Z₂ 22,695,609)

En esta solución, Z₁ fue sacrificado en \$ 739,207 pesos y hubo una disminución de \$ 2,638,897 pesos en Z₂. Esta mejora tiene su explicación en el alto valor de Z₂ en la primera iteración, lo cual otorga gran flexibilidad al programa para mejorar los niveles de riesgo. El empleo alcanza a las 1,517 JH, nivel indicativo de su alta exigencia en mano de obra.

El centro decisor juzgó insuficiente el valor en que se disminuyó el riesgo, y expresó su disposición a aceptar mayores sacrificios en el margen bruto. El vector se aprecia a continuación.

VECTOR SOLUCIÓN ITERACIÓN 3 (RIEGO) = (Z₁ 7,000,000; Z₂ 19,341,027)

Esta iteración consideró un descenso de \$ 1,739,207 para Z₁, lo cual generó un valor menor de Z₂ en \$ 5,933,479. El impacto del sacrificio de Z₁, como se puede observar es importante, más aún si se compara con el resultado de la iteración anterior. En cuanto al empleo, hay una disminución con respecto al óptimo para riego. Sin embargo las 1,114 JH siguen representando un sistema intensivo en el uso de mano de obra.

Al llegar a este punto, el centro decisor manifestó su conformidad con la solución, que si bien no mejora el riesgo económico, si lo hace fuertemente con el margen bruto. Para este compromiso, el centro decisor tuvo en consideración otro factor no cuantificado en esta aplicación, cual es, la evidente disminución del riesgo técnico que se da al contar la explotación con riego.

En el Cuadro 18 se presenta el resumen de las soluciones en término de los valores que toman los objetivos y las variables de decisión.

CUADRO 18. RESUMEN DE SOLUCIONES MODELO INTERACTIVO STEP, ALTERNATIVA RIEGO

Soluciones Eficientes	Funciones objetivo		Variables de decisión						Empleo
	Z ₁ Margen Bruto (M\$)	Z ₂ Riesgo (M\$)	X ₁ Avena (ha)	X ₂ Cebada (ha)	X ₃ Frejol (ha)	X ₄ Remolacha (ha)	X ₅ Trigo (ha)	X ₆ Carne Bovina (ha)	JH ⁺
Optimo*	5,500,000	12,808,224	0,1	7.7	0.0	6.9	11.0	14.3	687
Iteración	18,739,207	25,334,506	0.0	0.0	26.4	13.2	0.3	0.0	1,866
Iteración	28,000,000	22,695,609	0.0	0.0	14.0	13.3	10.8	2.0	1,517
Iteración	37,000,000	19,341,029	2.0	0.0	0.9	12.8	20.0	4.3	1,114

*: acciones de desarrollo

+ : jornadas hombre

Con respecto a las alternativas productivas incluidas en las soluciones del Cuadro 18, es importante destacar lo siguiente:

- Las tres alternativas, especialmente en la primera iteración para riego, incorporan frejol y remolacha en porcentajes altos. Ello se entiende por ser ambas exigentes en riego y rentables.
- La escasa participación del rubro bovino de carne, lo que ratifica la idea de que el nivel tecnológico en que se maneja este rubro no puede competir con suelos bajo riego. Sin embargo, los campesinos le asignan a este rubro un rol de ahorro y estabilización del sistema. Por esta razón, se hace indispensable que en un futuro próximo se de mayor atención a la investigación y aplicación de nuevas tecnologías en la ganadería de las economías campesinas.
- El trigo eleva su participación en la medida que se tiende a buscar un menor riesgo, lo que reafirma su papel estabilizador en las economías campesinas. La cebada no aparece en los planes de explotación debido posiblemente a su bajo margen bruto.

Acceso de los productores a recursos crediticios

Para introducir el acceso al crédito fue necesario modificar la restricción correspondiente al capital de operación, simulando en el término independiente la disponibilidad

suplementaria de dinero. En el Cuadro 19, aparecen los valores máximos y mínimos para ambos objetivos una vez modificado el modelo.

CUADRO 19. MATRIZ DE INTERCAMBIO PARA AMBOS OBJETIVOS, ALTERNATIVA CAPITAL

	Margen bruto (Z_1)	Riesgo económico (Z_2)
Margen bruto (Z_1)	6,993,064	13,639,779
Riesgo económico (Z_2)	3,127,934	3,886,877

Los valores de la matriz están expresados en pesos (\$)

Se procedió del mismo modo utilizado anteriormente en la primera iteración, obteniendo el vector solución para la alternativa capital.

VECTOR SOLUCIÓN ITERACIÓN 1 (CAPITAL) = (Z_1 6,993,064; Z_2 13,639,779)

En esta primera iteración se aprecia que sucedió exactamente lo mismo que para la alternativa riego, ya que el valor de Z_1 alcanzó a su ideal (Cuadro 19), haciendo imposible su aumento en este contexto.

Continuando con la etapa interactiva del método STEP, el programa entregó los siguientes valores:

VECTOR SOLUCIÓN ITERACIÓN 2 (CAPITAL) = (Z_1 6,800,000; Z_2 12,243,313)

Como se puede apreciar en esta iteración, Z_1 se sacrificó en \$ 193,064, y el riesgo disminuyó en \$ 1,396,466. Por cada unidad de margen sacrificada, hubo una mejoría en 7.2 unidades de riesgo. La necesidad de mano de obra llega a las 409 jornadas.

VECTOR SOLUCIÓN ITERACIÓN 3 (CAPITAL) = (Z_1 6,700,000; Z_2 11,970,271)

La disminución en Z_1 de \$ 293,064, permitió un importante descenso de Z_2 en \$ 1,669,508. Con los resultados obtenidos, se puede afirmar que en general es más sencillo para el centro decisor lograr niveles crecientes de seguridad económica que de mayor rentabilidad. Suele suceder, como en esta solución, que junto con mejorar el nivel del riesgo económico se cause una menor demanda de empleo, el que en este caso llega a las 389 JH. Al llegar a este punto el centro decisor manifestó su satisfacción con la solución propuesta.

En el Cuadro 20 se presentan los resultados en el campo de los objetivos y variables de decisión.

CUADRO 20. RESUMEN DE SOLUCIONES MODELO INTERACTIVO STEP, ALTERNATIVA CAPITAL

Soluciones Eficientes	Funciones objetivo		Variables de decisión						Empleo
	Z ₁ Margen Bruto (M\$)	Z ₂ Riesgo (M\$)	X ₁ Avena (ha)	X ₂ Cebada (ha)	X ₃ Frejol (ha)	X ₄ Remolacha (ha)	X ₅ Trigo (ha)	X ₆ Carne Bovina (ha)	JH ⁺
Optimo*	5,500,000	12,808,224	0.1	7.7	0.0	6.9	11.0	14.3	687
Iteración 1	6,993,064	13,639,779	9.0	0.0	10.0	1.0	20.0	0.0	471
Iteración 2	6,800,000	12,243,313	0.0	0.0	6.6	1.0	19.3	13.1	409
Iteración 3	6,700,000	11,970,271	0.0	0.0	5.8	1.0	19.2	13.9	389

*: acciones de desarrollo

+ : jornadas hombre

Desde la perspectiva de las variables de decisión, estos planes de explotación se pueden caracterizar del siguiente modo:

- Las iteraciones dos y tres incorporan sólo frejol, remolacha, trigo y bovinos, siendo la variable trigo la más importante en superficie.
- Los bovinos, como elemento característico en todas las iteraciones que buscan minimizar el riesgo, están presentes en superficies importantes.
- La cebada no aparece en ninguna de las soluciones. Este rubro es cultivado por los productores pese a su baja rentabilidad, cuando existe contrato con alguna de las empresas cerveceras que aseguran su comercialización.

Al hacer un análisis comparativo de las tres acciones de desarrollo evaluadas, se puede afirmar que éstas repercuten favorablemente sobre los objetivos del centro decisor.

La introducción del rubro zanahoria y del crédito por separado, tienen un efecto bastante similar sobre los objetivos. Sin embargo, la primera acción de desarrollo tiene un mayor efecto en lo relacionado con el uso de mano de obra. Con respecto al riego, éste tiene un mayor impacto sobre el margen bruto predial que las otras dos acciones. Sin embargo, también aumenta el riesgo económico.

Por último, los resultados en términos de los objetivos, mejoraron en un grado menor a lo esperado por el centro decisor. De ahí surgió la iniciativa de explorar el impacto de combinaciones de acciones de desarrollo. Para ello, fue necesario modificar las restricciones de capital y riego, además de incorporar la zanahoria como una séptima alternativa productiva. En el Cuadro 21 se aprecian los valores máximos y mínimos para ambos objetivos.

CUADRO 21. MATRIZ DE INTERCAMBIOS PARA AMBOS OBJETIVOS, COMBINACIÓN (ZANAHORIA + RIEGO + CAPITAL)

	Margen bruto (Z₁)	Riesgo económico (Z₂)
Margen bruto (Z ₁)	49,230,780	130,155,234
Riesgo económico (Z ₂)	3,127,934	3,886,877

Los valores de la matriz están expresados en pesos (\$)

Los resultados de la primera iteración fueron los siguientes:

VECTOR SOLUCIÓN ITERACIÓN 1 (COMBINACIÓN) = (Z₁ 49,230,790; Z₂ 130,155,234)

Como era de esperar, al liberar el programa de las principales restricciones, el margen bruto aumentó fuertemente, superando casi nueve veces al óptimo. Con el riesgo económico sucedió igual. El empleo requerido, 4,069 JH, permitiría mantener a cerca de 18 trabajadores durante la temporada agrícola. Desde todo punto de vista, la solución obtenida está fuera de las posibilidades y niveles de aspiración del centro decisor, por lo tanto es necesario reiniciar el algoritmo interactivo buscando una alternativa que articule mejor sus preferencias. Como no es posible incrementar Z₁, ya que éste alcanzó su punto ideal, la segunda iteración persigue disminuir Z₂. El vector solución para la iteración 2 es el siguiente:

VECTOR SOLUCIÓN ITERACIÓN 2 (COMBINACIÓN) = (Z₁ 9,000,000; Z₂ 20,861,519)

El margen bruto fue sacrificado en \$ 40,230,790, provocando una mejoría en Z₂ de \$ 109,293,715. El intercambio entre los objetivos es positivo, por cada unidad de Z₁ sacrificada, el riesgo disminuyó en 2.7 unidades. La demanda de mano de obra es inferior al resultado de la primera iteración, llegando sólo a 806 JH. Con los valores obtenidos, especialmente en Z₂, el centro decisor estimó necesario reducir estos niveles de riesgo a través de otra iteración. El vector que recoge esta tercera iteración es:

VECTOR SOLUCIÓN ITERACIÓN 3 (COMBINACIÓN) = (Z₁ 8.000.000; Z₂ 17.310.770)

Como se puede apreciar, el valor del margen bruto se definió en \$ 8 millones, logrando un descenso de \$ 3,550,749 en Z₂ con respecto a la solución anterior. En términos de los niveles de aspiración del centro decisor, esta solución satisface sus expectativas.

Por último, se presenta un resumen de las soluciones obtenidas (Cuadro 22).

**CUADRO Nº 22. RESUMEN DE SOLUCIONES MODELO INTERACTIVO STEP
COMBINACIÓN (ZANAHORIA + RIEGO + CAPITAL)**

Soluciones Eficientes	Funciones objetivo		Variables de decisión							Empleo
	Z ₁ Margen Bruto (M\$)	Z ₂ Riesgo (M\$)	X ₁ Avena (ha)	X ₂ Ceba- da (ha)	X ₃ Frejol (ha)	X ₄ Remo- lacha (ha)	X ₅ Trigo (ha)	X ₆ Came Bovina (ha)	X ₇ Zana- horia (ha)	JH ⁺
Optimo*	5,500,000	12,808,224	0.1	7.7	0.0	6.9	11.0	14.3	—	687
Iteración 1	49,230,790	130,155,234	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	39.0	4,069
Iteración 2	9,000,000	20,861,519	0.0	0.0	0.0	5.8	20.0	11.9	2.3	806
Iteración 3	8,000,000	17,310,770	0.0	0.0	0.4	4.3	20.0	13.8	1.4	629

*: acciones de desarrollo

+: jornadas hombre

Con respecto a las variables de decisión, se puede mencionar lo siguiente:

- La combinación de alternativas productivas en la primera solución fue la esperada, dadas las modificaciones introducidas al modelo. El programa asignó el mínimo para la remolacha y las 39 hectáreas restantes a la zanahoria. Ello explica los elevados valores de ambos objetivos.
- Ninguna de las soluciones incorpora avena ni cebada por su baja contribución al margen bruto predial.
- Tanto el trigo como los bovinos tienen una participación importante en ambas iteraciones. Como ha ocurrido en la mayor parte de las soluciones que buscan mejorar el riesgo de explotación, la suma de ambas alternativas sobrepasa el 50% del total de las hectáreas.
- En la tercera iteración nuevamente se genera, con la remolacha y el frejol, un efecto de sustitución, ya que la disminución de la primera implica el aumento de la segunda.

Por otra parte, pese a que la segunda iteración no respondió plenamente a las expectativas del centro decisor, la combinación de rubros y los valores de los objetivos obtenidos, la hacen ser una alternativa interesante desde la perspectiva del análisis de sistemas por la integración de esfuerzos que ahí se da.

Finalmente, al analizar los resultados se aprecia claramente una estrecha relación entre determinadas variables de decisión y el objetivo que se privilegia. En las iteraciones que persiguen un aumento de la rentabilidad predial, es más relevante la participación de los frejoles y de la remolacha. Por el contrario, cuando se trata de mejorar el riesgo económico del sistema, el modelo asigna valores mayores a los bovinos y al trigo.

Desde la perspectiva de los objetivos del centro decisor, las alternativas productivas avena y cebada tienen una escasa gravitación. El sentido de su incorporación por parte de los productores, está en la facilidad de comercialización de la cebada y el uso de la avena como forraje suplementario invernal.

Las alternativas de desarrollo incorporadas al sistema mejoraron los niveles de satisfacción del decisor, particularmente en lo relativo a la mejora en los ingresos. Sin embargo, queda claramente demostrada la necesidad de articular los distintos programas asistenciales potenciando así, su impacto en el medio local.

4.3 TERCERA APLICACIÓN : PROGRAMACIÓN COMPROMISO (ROJAS, 1991)

A. Material y método

Este tercer trabajo también se realizó en la Cooperativa Campesina Chacayal de Los Angeles, en la provincia de Bío Bío, Octava Región, Chile.

Para definir el universo, al igual que en el caso anterior, se tomó como base un trabajo previo de diagnóstico^{13/} que consistió en dividir a los socios en tres estratos de acuerdo a la superficie que poseían.

Entre éstos, se eligió el estrato de 64 socios que poseían entre 5 y 15 hectáreas, seleccionándose al azar una muestra de 8 productores que representaron el 12.5% del universo. Es decir, esta aplicación se realizó con agricultores cuyos predios eran de menor tamaño que los usados en la segunda aplicación (método interactivo STEP).

Para obtener los datos se utilizó una metodología de encuesta-entrevista (Aguirre et al., 1987), recolectándose información referida a los objetivos y a las técnicas y alternativas productivas de los campesinos en el período agrícola 1987-88. Antes se les había identificado y detallado sus recursos productivos. Con los datos recolectados se construyó un modelo matemático, utilizando para ello la técnica de Programación Compromiso (Zeleny, 1973).

Una vez construido este modelo, se le incorporaron dos de las acciones de desarrollo explicadas en la aplicación anterior (capital y riego), de acuerdo a la metodología señalada al inicio del capítulo.

B. Resultados y discusión

B.1 Estructura teórica del modelo

Para la construcción del modelo de análisis y planificación, bajo el contexto de objetivos múltiples, se definieron seis variables de decisión de acuerdo a la cantidad de hectáreas destinadas a la producción de: trigo (X_1), frejol (X_2), lentejas (X_3), papas (X_4), remolacha azucarera (X_5) y bovinos de carne (X_6). Los objetivos considerados fueron la maximización del margen bruto y la minimización del riesgo económico.

El Cuadro 23 muestra el modelo estructural, donde las diez primeras restricciones corresponden a la utilización del modelo para medir riesgo económico de la producción,

con MB_i representando el margen bruto del i -ésimo año y MB^*_j el margen bruto promedio de la j -ésima alternativa productiva (Hazell, 1971).

La restricción 11 corresponde a la superficie predial y las restricciones 12 y 13 a las rotaciones mínimas para trigo y remolacha (X_1 y X_5 , respectivamente).

La restricción 14 indica los cultivos que necesitan riego (frejol y remolacha) y la superficie disponible para ello, representando 0.27 el porcentaje destinado al cultivo de trébol rosado para alimentación bovina.

La restricción número 15 corresponde a los costos directos según alternativa productiva y al capital disponible, siendo el capital necesario para remolacha aportado en forma de crédito por la Industria Azucarera Nacional (IANSA).

Las restricciones 16 a 18 representan las superficies mínimas para trigo, frejol y papas destinadas al autoconsumo.

Las restricciones 19 y 20 corresponden a restricciones de superficie mínima establecidas por IANSA (mínimo de una hectárea de superficie física para el cultivo de remolacha) y por los campesinos para la crianza de ganado de carne con fines de autoconsumo y reserva de capital.

CUADRO 23. MODELO ESTRUCTURAL

Funciones objetivo:

$$\text{Máx } Z_1 = MB_1 X_1 + MB_2 X_2 + MB_3 X_3 + MB_4 X_4 + MB_5 X_5 + MB_6 X_6$$

$$\text{Min } Z_2 = X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20} + X_{21} + X_{22} \\ + X_{23} + X_{24} + X_{25} + X_{26}$$

Sujeto a:

$$(MB_1 X_1 MB_1^* X_1) + (MB_1 X_2 MB_2^* X_2) + (MB_1 X_3 MB_3^* X_3) + (MB_1 X_4 MB_4^* X_4) + (MB_1 X_5 MB_5^* X_5) \\ + (MB_1 X_6 MB_6^* X_6) + X_7 - X_8 = 0$$

$$(MB_2 X_1 MB_1^* X_1) + (MB_2 X_2 MB_2^* X_2) + (MB_2 X_3 MB_3^* X_3) + (MB_2 X_4 MB_4^* X_4) + (MB_2 X_5 MB_5^* X_5) \\ + (MB_2 X_6 MB_6^* X_6) + X_9 - X_{10} = 0$$

$$(MB_3 X_1 MB_1^* X_1) + (MB_3 X_2 MB_2^* X_2) + (MB_3 X_3 MB_3^* X_3) + (MB_3 X_4 MB_4^* X_4) + (MB_3 X_5 MB_5^* X_5) \\ + (MB_3 X_6 MB_6^* X_6) + X_{11} - X_{12} = 0$$

$$(MB_4 X_1 MB_1^* X_1) + (MB_4 X_2 MB_2^* X_2) + (MB_4 X_3 MB_3^* X_3) + (MB_4 X_4 MB_4^* X_4) + (MB_4 X_5 MB_5^* X_5) \\ + (MB_4 X_6 MB_6^* X_6) + X_{13} - X_{14} = 0$$

$$(MB_5 X_1 MB_1^* X_1) + (MB_5 X_2 MB_2^* X_2) + (MB_5 X_3 MB_3^* X_3) + (MB_5 X_4 MB_4^* X_4) + (MB_5 X_5 MB_5^* X_5) \\ + (MB_5 X_6 MB_6^* X_6) + X_{15} - X_{16} = 0$$

$$(MB_6 X_1 MB_1^* X_1) + (MB_6 X_2 MB_2^* X_2) + (MB_6 X_3 MB_3^* X_3) + (MB_6 X_4 MB_4^* X_4) + (MB_6 X_5 MB_5^* X_5) \\ + (MB_6 X_6 MB_6^* X_6) + X_{17} - X_{18} = 0$$

$$(MB_7 X_1 MB_1 * X_1) + (MB_7 X_2 MB_2 * X_2) + (MB_7 X_3 MB_3 * X_3) + (MB_7 X_4 MB_4 * X_4) + (MB_7 X_5 MB_5 * X_5) + (MB_7 X_6 MB_6 * X_6) + X_{19} - X_{20} = 0$$

$$(MB_8 X_1 MB_1 * X_1) + (MB_8 X_2 MB_2 * X_2) + (MB_8 X_3 MB_3 * X_3) + (MB_8 X_4 MB_4 * X_4) + (MB_8 X_5 MB_5 * X_5) + (MB_8 X_6 MB_6 * X_6) + X_{21} - X_{22} = 0$$

$$(MB_9 X_1 MB_1 * X_1) + (MB_9 X_2 MB_2 * X_2) + (MB_9 X_3 MB_3 * X_3) + (MB_9 X_4 MB_4 * X_4) + (MB_9 X_5 MB_5 * X_5) + (MB_9 X_6 MB_6 * X_6) + X_{23} - X_{24} = 0$$

$$(MB_{10} X_1 MB_1 * X_1) + (MB_{10} X_2 MB_2 * X_2) + (MB_{10} X_3 MB_3 * X_3) + (MB_{10} X_4 MB_4 * X_4) + (MB_{10} X_5 MB_5 * X_5) + (MB_{10} X_6 MB_6 * X_6) + X_{25} - X_{26} = 0$$

$$X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 = S$$

$$X_1 \leq S/2$$

$$X_5 \leq S/3$$

$$X_2 + X_5 + 0.27 X_6 \leq A$$

$$C_1 X_1 + C_2 X_2 + C_3 X_3 + C_4 X_4 + C_6 X_6 \leq K$$

$$X_1 \geq H$$

$$X_2 \geq R$$

$$X_3 \geq T$$

$$X_5 \geq G$$

$$X_6 \geq B$$

B.2 Especificación del modelo

Asignados los valores correspondientes a los coeficientes de las variables de decisión, restricciones y objetivos, se obtuvo el modelo operativo (Cuadro 24).

CUADRO Nº 24. MODELO OPERATIVO

Alternativas productivas										Variables de Desviación del Riesgo Económico										SIGNIFICADO								
X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₅	X ₂₆			
21,271	-5,222	-14,834	-317,679	109,347	-9,196	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₅	X ₂₆	=	0	Riesgo Año 1
12,448	-5,647	-32,277	-37,940	120,363	-8,517	1	-1	1	-1																	=	0	Riesgo Año 2
30,358	11,434	8,088	54,836	165,690	-548		1	-1																		=	0	Riesgo Año 3
-16,820	19,780	50,919	75,818	126,905	14,497			1	-1																	=	0	Riesgo Año 4
11,783	6,644	29,580	-32,185	-31,729	9,970				1	1																=	0	Riesgo Año 5
1,874	-53,613	6,650	38,161	-25,147	1,666					1	-1															=	0	Riesgo Año 6
-21,816	37,464	-8,398	153,686	-142,489	-704											1	-1									=	0	Riesgo Año 7
-48,754	14,059	-53,396	10,283	-182,323	-2,614															1	-1					=	0	Riesgo Año 8
-6,793	-19,371	-16,842	-119,999	-114,764	-4,388																					=	0	Riesgo Año 9
16,450	-5,529	30,508	175,019	-25,852	-246																					=	0	Riesgo Año 10
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	=	12.50	Sup. total (ha)
1																										=	6.25	Sup. máx. trigo (ha)
																										=	4.16	Sup. máx. remolacha (ha)
																										=	4.00	Sup. máx. riego (ha)
69,094	53,945	41,459	174,027		15,350				0,27																	=	-460,338	Capital disponible (\$)
1																										=	0.86	Autoconsumo trigo (ha)
																										=	0.25	Autoconsumo poroto (ha)
																										=	0.10	Autoconsumo papas (ha)
																										=	1.00	Sup. mín. remolacha (ha)
																										=	1.61	Sup. mín. bovinos (ha)
78,540	122,559	17,197	4,5432	176,048	14,561																					Z ₁	Máx	Margen Bruto (\$)
																										Z ₂	Mín	Riesgo Económico (\$)

B.3 Resultados de la aplicación del modelo

La matriz de intercambio se construyó optimizando cada uno de los objetivos por separado (Cuadro 25).

CUADRO 25. MATRIZ DE INTERCAMBIO PARA DOS OBJETIVOS MODELO N° 1

	Margen bruto (Z ₁)	Riesgo económico (Z ₂)
Margen bruto (Z ₁)	1,000,038	4,157,572
Riesgo económico (Z ₂)	435,314	1,187,911

Los valores de la Matriz están expresados en pesos (\$)

Los valores de la primera fila indican el máximo valor que alcanza el margen bruto (\$ 1,000,038) al cual le corresponde un valor de riesgo económico de \$ 4,157,572. La segunda fila muestra el óptimo valor que alcanzó el riesgo económico, en este punto el margen bruto es de \$ 435,314. De acuerdo con ésto el punto ideal está representado por el vector:

$$\text{VECTOR IDEAL} = (Z_1 \ 1,000,038; Z_2 \ 1,187,911)$$

Como se explicó con detenimiento en el Capítulo 4, la programación compromiso asume que el centro decisor elegirá la solución que se acerque lo más posible al punto ideal.

Para la obtención del conjunto compromiso se calcularon los valores para las métricas L_1 y L_2 .

La mejor solución compromiso para la métrica L_1 se logró mediante la resolución del siguiente programa^{14/}:

$$\text{Min } L_1 = \frac{W_1 (1,000,038 - Z_1(x))}{1,000,038 - 435,314} + \frac{W_2 (Z_2(x) - 1,187,911)}{4,157,572 - 1,187,911}$$

$$x \in F$$

Para la métrica L_2 la mejor solución compromiso se obtuvo resolviendo:

$$\text{Min } L_2 = X_{27}$$

$$\frac{W_1 (1,000,038 - Z_1(x))}{1,000,038 - 435,314} \leq X_{27}$$

14/ Se asume que $W_1 = W_2$, es decir para el CD ambos objetivos tienen igual importancia.

$$\frac{W_2 (Z_2(x) - 1.187.911)}{4.157.572 - 1.187.911} \leq X_{27}$$

$$x \in F$$

Como resultado de los cálculos de estas métricas se definió el conjunto compromiso, que se observa en la Figura 3 y el Cuadro 26.

CUADRO 26. SOLUCIÓN COMPROMISO Y PLAN DE EXPLOTACIÓN PREDIAL MODELO N° 1

Puntos	Funciones objetivo		Variables de decisión						Intercambio (trade-off)
	Z ₁ Margen Bruto (M\$)	Z ₂ Riesgo (M\$)	X ₁ Trigo (ha)	X ₂ Frejol (ha)	X ₃ Lenteja (ha)	X ₄ Papa (ha)	X ₅ Remolacha (ha)	X ₆ Carne Bovina (ha)	
A -> L ₁	750,460	1,647,616	4.00	1.37	0.00	0.10	1.00	6.03	0.029
B -> L ₂	772,000	2,386,352	3.19	0.25	0.06	0.74	2.00	6.18	

El segmento AB representa la zona del conjunto eficiente que se encuentra más próxima al punto ideal, zona que siguiendo la idea de Zeleny será preferida por un centro decisor racional.

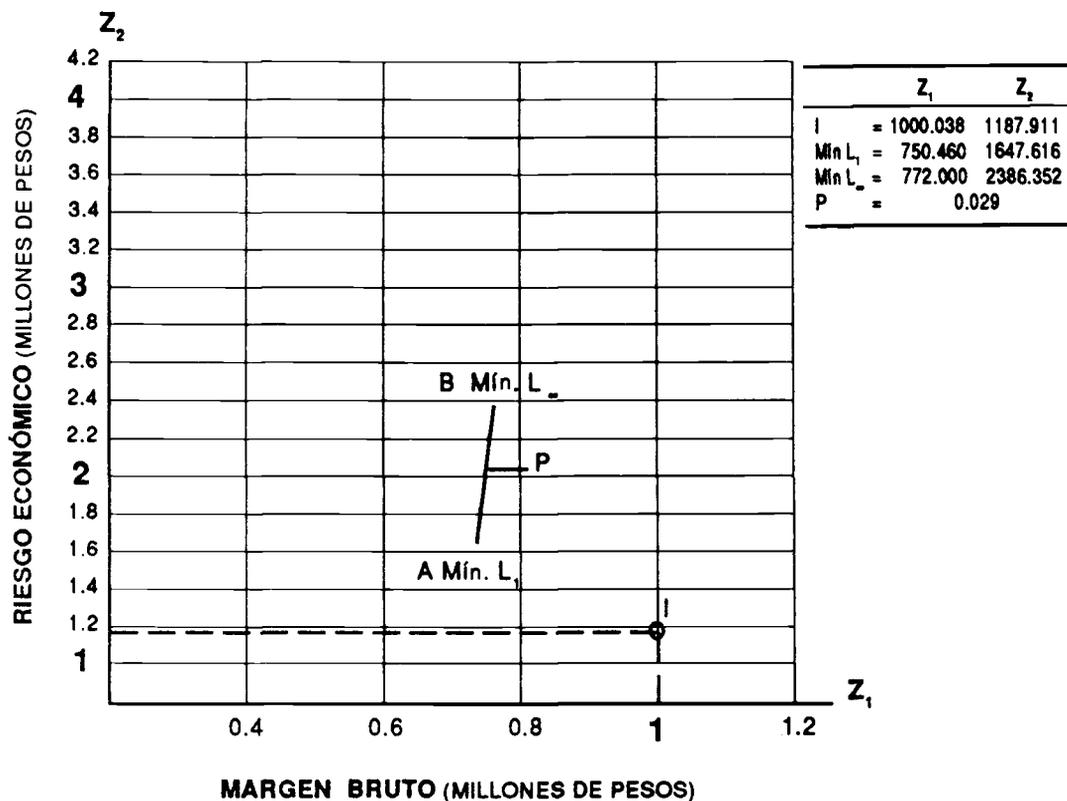
La pendiente de esta recta representa el intercambio o trade-off entre los objetivos del centro decisor. Este debe ser considerado como el costo de oportunidad del margen bruto en términos del riesgo económico o viceversa. En otras palabras, significa cuánto sacrifica el centro decisor de un objetivo cuando mejora en una unidad el otro.

El resultado obtenido con el cálculo de la pendiente del segmento AB (Figura 3) es de 0.029, lo que quiere decir que por cada \$ 1,000 que mejora el riesgo económico, el margen bruto disminuye en \$ 29 en este segmento del conjunto eficiente.

En el campo de las variables de decisión se aprecia bastante similitud en las dos soluciones, con la excepción del aumento de la remolacha en la solución L₂, lo que concuerda con la característica del cultivo de alto margen, pero también de alto riesgo. Por otra parte, vuelve a ponerse de manifiesto la importancia de la producción bovina, transformándose en un rubro que sin tener gran margen bruto se complementa muy bien con el resto de los cultivos.

Al analizar en detalle el modelo, es interesante resaltar que el capital y el riego del que disponen los campesinos, aparecen como restricciones activas en el plan de explotación entregado por la solución compromiso.

FIGURA N° 3. SOLUCIÓN COMPROMISO, MODELO N° 1



Esta situación creó la necesidad de poder evaluar *ex-ante* el impacto del relajamiento de estas restricciones sobre los objetivos de las agriculturas campesinas^{15/}.

A continuación se procedió a calcular el conjunto compromiso para esta nueva situación. En primera instancia fue necesario construir la matriz de intercambios (Cuadro 27).

CUADRO 27. MATRIZ DE INTERCAMBIOS PARA DOS OBJETIVOS, RIEGO MAS CRÉDITO

	Margen bruto (Z1)	Riesgo económico (Z2)
Margen bruto (Z1)	1,535,056	4,604,528
Riesgo económico (Z2)	428,608	1,176,370

Los valores de la Matriz están expresados en pesos (\$)

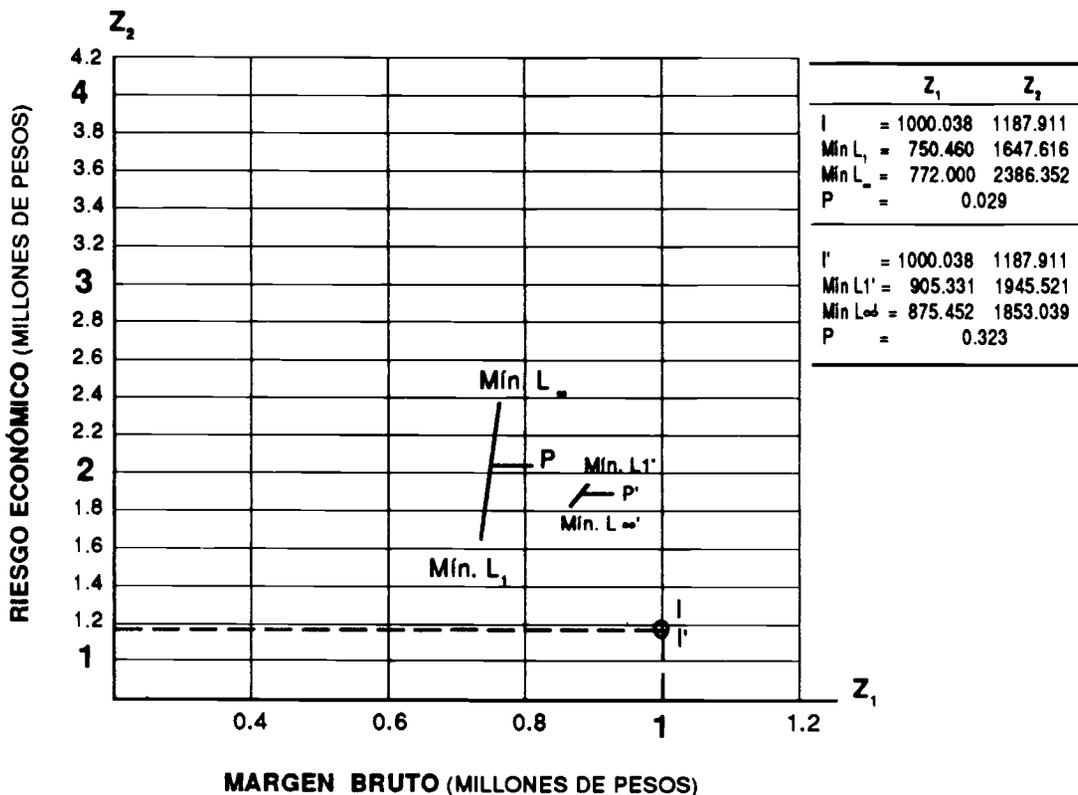
15/ Estas dos acciones, como se vió en la aplicación anterior, forman parte de la línea de trabajo del estado a través de organismos como INDAP y FOSIS. Ellas se encuentran además dentro de las prioridades de la Cooperativa.

Los resultados del cálculo del conjunto compromiso aparecen en la Figura N° 4.

En relación con las variables de decisión, se produce un fuerte reemplazo de los cultivos más rentables pero intensivos en capital y riego (frejol), por los menos rentables (ganadería).

Al comparar los conjuntos compromiso del modelo matriz con el nuevo conjunto obtenido bajo el supuesto de acciones de desarrollo (Figura N° 4), llama la atención que las acciones de desarrollo contempladas tienen un gran impacto sobre las ganancias del campesino. Sin embargo, invariablemente aumentan el riesgo económico. Es interesante tener presente porqué podría explicar ciertas actitudes refractarias al cambio por parte de los agricultores.

FIGURA N° 3. SOLUCIÓN COMPROMISO, MODELO N° 1 Y MODELO N° 2



4.4 CONCLUSIONES GENERALES DE LAS APLICACIONES

- a. La programación multicriterio se muestra como un excelente instrumento de apoyo a la fase de diseño, entregando información no sólo sobre la innovación o acción de desarrollo en sí misma, sino también sobre las relaciones (y sus consecuencias) entre esta innovación y todos los demás componentes del sistema de producción, considerados simultáneamente.
- b. La existencia de más de un objetivo como elemento base para las decisiones de los campesinos, exige el uso de instrumentos de análisis que permitan reflejar esta realidad. En este sentido, la programación multicriterio aparece como una alternativa muy interesante y de fácil incorporación.
- c. No existe una técnica mejor que otra, sino que todas tienen ventajas y desventajas. Dependiendo del tipo de aplicación hay algunas más convenientes. Sin embargo, en relación con los trabajos realizados, podemos afirmar lo siguiente:
 - Cuando se pretende potenciar la función descriptiva (como es el caso de las tres aplicaciones) la programación multiobjetivo presenta una cierta ventaja.
 - La programación compromiso podría mejorar su información cuando se presenta como un complemento de la programación multiobjetivo.
 - En los modelos interactivos, el centro decisor al disponer de la información necesaria e interactuar con el analista, mejoró notablemente su capacidad de elección entre distintas alternativas. A pesar de esto, es posible explorar otros métodos interactivos con menos exigencias en cuanto a información.
- d. En relación con el diseño de acciones de desarrollo, se evidencia una tendencia a mejorar fundamentalmente el margen bruto, despreocupándose un poco del riesgo económico que asume el campesino al poner en marcha una determinada mejora.

CAPÍTULO 5

Bibliografía

-
- AGUIRRE, F., D. REY, y C. BECA. 1987.** La asistencia Técnica. Propuesta Metodológica para el trabajo con productores campesinos. AGRARIA-PIIE. 105 p. Santiago.
- AMADOR, F., A. BARCO y C. ROMERO. 1985a.** *"Maximización del empleo frente a estabilidad de la mano de obra en un programa de reforma agraria en Andalucía: Una aplicación de la programación compromiso"*. En: Asociación Española Económica y Social. Agraria (Ed.). Trabajos elaborados por autores españoles para XIX Cong. Int. de Economistas Agrarios. pp 19-26. Málaga, España.
- AMADOR, F., A. BARCO y C. ROMERO. 1985b.** Labour stability vs. business profitability in an agrarian reform programme in Andalucía, Spain. A compromise programming application. Trabajo presentado a la XXI Reunión del Grupo Multiobjetivo de la Federación Europea de la Sociedad de Investigación Operativa. Lisboa, Portugal.
- ARTHUR, J. y A. RAVINDRAN. 1978.** An efficient goal programming algorithm using constraint partitioning and variables elimination. *Management Science* 24:867-868.
- BARROS, O. 1973.** Investigación operativa. Análisis de Sistemas. Ed. Universitaria, Santiago, Chile.
- BENAYOUN, R., J. de MONTGOLFIER, J. TERGNY y O. LARICHEV. 1971.** Linear programming with multiple objective functions: Step method (STEM). *Mathematical Programming* 1:366-375.
- BENGOA, J., J. CRISPI, M. CRUZ y C. LEIVA. 1984.** Capitalismo y Campesinado en el agro Chileno. Serie resultados de investigación N° 1. GIA. 304 p. Santiago.
- BERDEGUE, J. 1989.** El enfoque del investigador de sistemas de producción campesinos. Grupo de Investigaciones Agrarias (GIA). Chile.
- BERDEGUE, J. y B. LARRAIN. 1987.** Cómo trabajan los campesinos, una propuesta Metodológica. Cuadernillo de Información Agraria N° 18. GIA. 63 p. Santiago.
- BERDEGUE, J., M. DIAZ, R. GARCIA, I. NAZIF y X. QUEZADA. 1988.** *"Marco conceptual para el análisis y evaluación de sistemas de producción campesino"*. En: Sistemas de producción Campesinos. GIA. pp 139-154. Santiago.
- BINELLI, P. 1991.** Un modelo interactivo de planificación predial. Memoria de título. Facultad de Ciencias Pecuarias y Medicina Veterinaria de la Universidad de Chile. 103 p.
- BOUCHER, D. 1985.** El Sistema Agropecuario (Farming Systems) del Campesinado. *Agricultura y Sociedad* 1:19-23. Santiago.
- CALATRAVA. 1980.** La programación Multicriterio: Consideraciones teóricas y estudio de las ventajas e inconvenientes de su empleo como instrumento de análisis en

-
- planificación agraria. An. Inst. Nac. Inv. Agrarias. Secc. Econ. y Social. Agraria. 5:131-145. Madrid.
- CEÑA, F. y C. ROMERO. 1982.** Evaluación económica y financiera de inversiones agrarias. Ed. Banco Crédito Agrícola. Madrid, España.
- CONTINI, B. 1968.** A stochastic approach to goal programming. Opns. Res. 3:576-586.
- COHON, J.L. y D.H. MARKS. 1975.** A review and evaluation of multiobjective programming techniques. Water Resources Research. 11:208-220. New York.
- COHON, J.L. 1978.** Multiobjective programming and planning. Ed. Academic Press. 296 p. New York.
- COHON, J.L., R. CHURCH y D. SHEER. 1979.** "Generating Multiobjective Trade-Off: An Algorithm for Bicriterion Problem". Water Resources Research 15:1001-1010. New York.
- CHANKONG, V. 1977.** Multiobjective decision-making analysis. Ph.D, Case Western Reserve University. pp 250-262. Cleveland.
- CHANKONG, V. y Y.Y. HAIMES. 1983.** Multiobjective decision-making, Theory and Methodology. Ed. North-Holland. 255 p. New York.
- CHARNES, A. y W. COOPER. 1961.** Management Models and Industrial Applications of Linear Programming. Ed. John Wiley and Sons Inc. 1:467 p. New York.
- CHILE. MINISTERIO DE AGRICULTURA. INSTITUTO DE DESARROLLO AGROPECUARIO (INDAP). 1991a.** Reglamento de transferencia tecnológica. 22 p. Santiago.
- _____. 1991b. Reglamento General de Créditos. 17 p. Santiago.
- _____. 1991c. Marco de Acción y Programación. 43 p. Santiago.
- DAUER, J. y R. KRUEGER. 1977.** An iterative approach to goal programming. Opl. Res. Q. 18:671-681.
- DUFUMIER, M. 1985.** Sistema de producción y desarrollo agrícola en el Tercer Mundo. CIPCA, 34 p. Piura, Perú.
- DUCKSTEIN, L. 1984.** Selection of a multiobjective technique for a water resources problems under uncertainties: Proceedings of the Engineering Foundation Conference. Multiobjective analysis in water resources. Ed. American Society of Civil Engineers. pp 180-202. USA.

-
- EVANS, J.J. y R. STEUER. 1973.** A revised implex method for linear multiple objective programs. *Mathematical Programming* 5:54-72.
- GEOFFRION, A., J. DYER y A. FEINBERG. 1972.** An interactive approach for multicriterion optimization, with an application to the operation of an Academic Department. *Management Science* 19:357-368. USA.
- GOICOCHEA, A. D. HANSEN y L. DUCKSTEIN. 1982.** Multiobjective decision analysis with engineering and business applications. Ed. John Wiley and Sons. 172 p. New York.
- HAIMES, Y. y W. HALL. 1974.** Multiobjectives in water resources systems analysis: the surrogate worth trade-off method. *Water Resources Research* 10:616-624. New York.
- HAIMES, Y. K. LOPARO, S. OLENIC y S. NANDA. 1980.** Multiobjective statistical method for interior drainage systems. *Water Resources Research* 16:465-475. New York.
- HAIMES, Y. y K. TARVAINEN. 1981.** Hierarchical-multiobjective framework for large scale systems: *Multicriteria Analysis in Practice*. pp 201-232. Londres.
- HALL, W. y Y. HAIMES. 1976.** *"The surrogate worth trade-off method with multiple decision-makers"*. In: *Multiple Criteria Decision-Making*. pp 207-233. Berlin.
- HAZZEL, P. 1971.** A linear alternative to quadratic and semivariance programming for farming planning under uncertainty. *Am. J. Agr. Econ.* 53:53-62.
- HWANG, C. y A. MASUD. 1979.** Multiple objective decision-making method and applications. Ed. Springer-Verlag. pp 45-56. Berlin.
- IGNIZIO, J. 1976.** *Goal Programming and Extensions*. Ed. Lexington Books. 250 p. Massachusetts, USA.
- IGNIZIO, J. 1982.** *Linear programming in single and multiple objective systems*. Ed. Prentice Hall Inc. USA.
- IJIRI, Y. 1965.** *Management goals and accounting for control*. Ed. North-Holland Publishing Company Amsterdam. Holanda.
- INSTALLE, M. 1988.** *Application des méthodes d'analyse des systèmes dynamiques au développement rural*. Université Catholique de Louvain. 32 p. Bruxelles.
- INSTITUTE NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE. 1984.** *Alimentación práctica de Bovinos. Versión Española*. Ed. Mundi-Prensa. 172 p. Madrid.
- ISERMANN, H. 1977.** The enumeration of the set of all efficient solutions for a linear multiple objective programs. *Opl. Res. Q.* 28:711-725.

-
- KLAHR, C. 1958.** Multiple objectives in mathematical programming. *Opns. Res.* 6:849-855.
- KVANLI, L. 1980.** Financial planning using goal programming. *Omega* 8:207-218.
- LEE, S. 1972.** Goal programming for decision analysis. Ed. Auerbach. Filadelfia, USA.
- MAZOYER, M. 1988.** Sistemas agrarios y desarrollo agrícola. *GIA, Agricultura y Sociedad* 6:7-21. Santiago.
- MONARCHI, D., C. KIESEL y L. DUCKSTEIN. 1973.** Interactive multiobjective programming in water resources: a case study. *Water Resources Research* 9:837-850. New York.
- NORMAN, D. 1980.** El método de investigación de sistemas agropecuarios: su pertinencia para el pequeño agricultor. MSU. Serie de estudios sobre el desarrollo rural. Reporte N° 5, 30 p. Michigan.
- REHMAN, T. y C. ROMERO. 1984a.** *"Multiple-criteria decision-making techniques and their role in livestock ration formulation"*. *Agricultural Systems* 15:23-49.
- REHMAN, T. y C. ROMERO. 1987.** *"An exploration of the usefulness of interactive approaches to multiple criteria decision models for agricultural planning"*. In: XX International Conference of Agricultural Economists. 10 p.
- RIVAS, T. 1990.** Programación multiobjetivo: una aproximación al análisis y evaluación de Sistemas Campesinos. Memoria de Título. Facultad de Ciencias Veterinarias y Pecuarias de la Universidad de Chile. 95 p. Chile.
- ROJAS, H. 1991.** Planificación predial en economías campesinas: una aplicación de la Programación Compromiso. Memoria de Título Facultad de Ciencias Veterinarias y Pecuarias de la Universidad de Chile. 123 p. Chile.
- ROMERO, C. 1981.** El enfoque multiobjetivo en los modelos matemáticos. *Revista de Economía Política* 89:179-204.
- ROMERO, C. 1984.** A note: Effects of five sided penalty functions in goal programming. *Omega*, 12:333.
- ROMERO, C. 1985a.** Multiobjective and goal programming approaches as a distance function model. *J. Opl. Res. Soc.* 36:249-251.
- ROMERO, C. 1986.** *"A survey of generalized goal programming (1970-1982)"*. *European J. Opl. Res.* En Prensa.
- ROMERO, C. y T. REHMAN. 1984a.** Goal programming and multiple criteria decision-making in farm planning: An expository Analysis. *J. Agri. Econ.* 35:177-190.

-
- ROMERO, C. y T. REHMAN. 1985a.** *"Una evaluación de las técnicas de programación multiobjetivo y por metas como instrumentos de planificación agraria"*. En: *Asoc. Española de Economía y Sociología Agraria*. (Ed) Trabajos elaborados por autores españoles para el XIX Cong. Int. de Economistas Agrarios. 173-179. Málaga, España.
- ROMERO, C. y T. REHMAN. 1985b.** Goal programming and multiple criteria decision-making in farm planning: some extensions. *J. Agric. Econ.* 36:171-185.
- ROY, B. 1976.** *"From optimization to multicriteria decision aid: three main operational attitudes"*. In: *Multiple Criteria Decision-Making*. Ed. Springer. pp 1-32. Berlin.
- SERVICIO EVANGELICO PARA EL DESARROLLO (SEPADE).** 1986. Diagnóstico Cooperativa Campesina Chacayal. 40 p. Concepción.
- STEUER, R. y A. SCHULER. 1978.** An interactive multiple objective linear programming approach to a problem in Forest Management. *Opns. Res.* 26:254-269.
- VALENZUELA, J. y F. GONZALEZ. 1987.** La producción campesina. *AGRARIA*, 160 p. Santiago.
- VALERO, F. 1977.** La programación lineal multicriterio. *Revista Española de Financiación y Contabilidad.* 22:63-76.
- VANDERPOOTEN, D. 1988.** A multicriteria interactive procedure supporting a directed learning of preferences. *Cahiers du Lamsade.* 18 p. Bruxelles.
- VILLALBA, D. 1974.** Programación por objetivos. *Revista Española de Financiación y Contabilidad* 8:371-386. Madrid.
- VINCKE, P. 1976.** Une méthode interactive en programmation linéaire á plusieurs fonctions économiques. *Revue Française d'Informatique et de Recherche Opérationnelle,* 2:5-20. Francia.
- WAGNER, H. 1970.** The ABS's of OR. *Operation Research.* 19(6):2-10. USA.
- WILLIS, C. and R. PERLACK. 1980a.** Multiple objective decision-making: Generating techniques of goal programming. *Southern Journal of Agricultural Economics* 1:199-204.
- WILLIS, C. and R. PERLACK. 1980b.** A comparison of generating techniques and goal programming for public investment, multiple objective decision-making. *American Journal of Agricultural Economics.* 62:66-74.
- ZADEH, L. 1963.** Optimality and Non-Scalar-Valued. Performance Criteria. *I.E.E.E. Transactions On Automatic Control.* Ac-8:59-60. USA.

ZELNY, M. 1973. "*Compromise programming*". In: Multiple decision-making (Cochrane, J.L. and Zeleny, M. Eds.) University of South Carolina Press, p. 262-301.

ZELNY, M. 1982. Multiple criteria decision-making. Ed. Mc Graw Hill. New York.

ZIONTS, S. y J. WALLENIUS. 1976. An Interactive programming method for solving the multiple criteria problem. *Management Science*. 22:652-663.

CAPÍTULO 6

Anexos

6.1 Anexo 1

La fase de diseño en la metodología de investigación y desarrollo de sistemas de producción (IDSP) tiene como objetivo traducir las conclusiones del diagnóstico en un programa de desarrollo. La clave del éxito de esta etapa y por consiguiente, de las etapas sucesivas, radica en asegurar que las alternativas que serán investigadas se ajusten a los objetivos del productor, al estado del sistema de producción y a las influencias restrictivas o estimulantes del medio ambiente (suprasistema) agro-ecológico y socio-económico (Berdegú, 1989).

La complejidad de esta tarea ha obligado a los investigadores a usar distintas herramientas con miras a racionalizar las decisiones en este sentido. Entre éstos destacan los modelos matemáticos de simulación y optimización. La ventaja de incorporar los modelos matemáticos al procedimiento, radica en que permiten el análisis de cualquier acción de desarrollo en el contexto de todo el predio en movimiento.

Entre los modelos llamados de optimización, han tomado un gran auge en las últimas décadas, aquellos que permiten incorporar más de un criterio de decisión. Estos son recogidos en la literatura bajo el nombre de Modelos de Programación Multicriterio.

La programación multicriterio no es otra cosa que una extensión de la programación lineal a problemas con más de un objetivo, dicho en forma muy simple, intenta asignar un recurso (en nuestro caso la tierra) en función de optimizar un conjunto de objetivos del centro decisor (maximizar margen bruto, minimizar riesgo económico, etc.) entre distintos cultivos o alternativas productivas posibles bajo una determinada técnica de producción, respetando las restricciones que pueda tener un predio. Estas últimas normalmente son agua para riego, mano de obra, horas máquina, capital y limitaciones técnicas como la rotación de cultivos.

La información que entrega un modelo con estas características dice relación con lo que se debe producir y en qué cantidad (número de hectáreas de cada cultivo seleccionado). Ahora bien, de acuerdo con esto queda pendiente unas de las preguntas más importantes desde el punto de vista de nuestro problema, cuál es ¿cómo producir? o dicho de otra forma, ¿cuál es la técnica de producción ideal para la realidad que se está planificando? Para encontrar una solución a este problema se usa la idea de escenarios, es decir, se aplica el modelo con una determinada técnica de producción y posteriormente se introducen cambios en las técnicas de producción (normalmente más modernas) repitiéndose la operación y comparándose externamente los resultados. A partir de esta comparación se selecciona la técnica de operación más eficiente, es decir que logra un mayor nivel de satisfacción en los objetivos planteados.

De igual forma, se puede evaluar *ex-ante* el impacto de la introducción de nuevas alternativas productivas, así como la relajación de las restricciones de los distintos sistemas de producción existentes, sobre los objetivos de los campesinos.

Las aplicaciones mostradas en el Capítulo 5 de este texto, se insertan en este marco y tienen como objetivo mostrar el papel que pueden jugar los modelos de programación multicriterio en la fase de diseño de las IDSP.