

# Departamento de Ingeniería Industrial

Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas  
Universidad de Chile

# DII

El Departamento de Ingeniería Industrial es parte de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, el mayor y más importante centro de ciencia e ingeniería del país.

Es el principal centro formador de ingenieros civiles industriales en el país. Dicta programas de calidad a nivel de postgrado, postítulo y cursos en las áreas de gestión y economía.

Es un centro en el que se realiza investigación de alto nivel que contribuye al mejoramiento de empresas e instituciones del país, que cuenta con una amplia y destacada vinculación internacional con prestigiosos centros académicos.

El Departamento es líder en el área de gestión de operaciones y recoge la vasta experiencia de sus integrantes en las áreas forestal, minera, de servicios y manufactura, tanto a través de proyectos de investigación como de consultoría.

## Académicos



Arellano, Soledad  
Ph. D. en Economía, MIT



Barros, Oscar  
Ph.D., Investigación Operativa,  
University of Wisconsin.



Espinoza, Daniel  
Ph. D. en Ingeniería Industrial y de  
Sistemas, Georgia Tech University



Holgado, Antonio  
M. Sc. en Ingeniería Industrial y  
Operaciones, University of Michigan



Perez, Victor  
M. Sc. Ingeniería Industrial y de  
Operaciones, University of Michigan  
ON LEAVE



Velasquez, Juan  
Ph. D. en Ingeniería de la  
Información, University of Tokyo



Balmaceda, Felipe  
Ph. D. en economía, Universidad  
de Cornell



Bosch, Máximo  
Ph.D (C) en Investigación de  
Operaciones, Wharton School,  
University of Pennsylvania



Fernández, Viviana  
Ph. D. en Economía, University of  
California, Berkeley



Moller, Patricio  
Ph. D. en Economía, University of  
California, Berkeley



Repetto, Andrea  
Ph. D en economía, MIT



Vignolo, Carlos  
Ph. D. (c) en Economía, University  
of Sussex



Barros, Oscar  
Ph.D., Investigación Operativa,  
University of Wisconsin.



Durán, Guillermo  
Doctor en Ciencias de la  
Computación, Universidad de  
Buenos Aires ON LEAVE



Figueroa, Nicolás  
Ph.D. en Economía, University of  
Minnesota



Mizala, Alejandra  
Ph. D. en Economía, University of  
California, Berkeley



Rey, Pablo  
Doctor en Ingeniería Eléctrica,  
Universidade Católica do Rio de  
Janeiro



Weber, Richard  
Ph. D. en Investigación de  
Operaciones, RWTH Aachen,  
Alemania



Bosch, Máximo  
Ph.D (C) en Investigación de  
Operaciones, Wharton School,  
University of Pennsylvania



Epstein, Rafael  
Ph.D en Investigaciones de  
Operaciones, MIT



Fischer, Ronald  
Ph. D. en Economía, Wharton  
School, University of Pennsylvania



O'Ryan, Raúl  
Ph. D. en Economía, Universidad  
de California, Berkeley



Romaguera, Pilar  
Ph.D en Economía, Boston  
University, Profesora ON LEAVE



Weintraub, Andrés  
Ph.D en Investigación de  
Operaciones, University of  
California, Berkeley.

# Programación Entera Mejora la Licitación de Raciones Alimenticias en Chile

# JUNAEB

La Junta Nacional de Auxilio Escolar y Becas (JUNAEB) es el organismo encargado de **administrar los recursos estatales destinados a velar por los niños, niñas y jóvenes chilenos**, de modo que éstos permanezcan y sean exitosos en el Sistema Educativo.

Para cumplir con esta tarea JUNAEB cuenta con diversos programas de apoyo en las áreas de Alimentación, Salud Escolar, Salud Mental, Salud Bucal, Vivienda Estudiantil, Recreación, Útiles Escolares y Becas.



## Licitación de Alimentos

Uno de sus principales objetivos es **entregar alimentación de calidad a alrededor de 1.800.000 alumnos** a lo largo del país durante la jornada escolar (desayuno, almuerzo, merienda y cena, según corresponda).

El programa se encarga también de la administración de los programas de alimentación de JUNJI e INTEGRA, organismos encargados de los jardines infantiles del país.

JUNAEB cuenta actualmente con un **presupuesto de US\$360 millones** para el programa de alimentación, prácticamente el doble del presupuesto del año 1997, cuando comenzó el trabajo del CGO.

## Licitación de Alimentos

El programa se aplica en establecimientos educacionales municipales o particulares subvencionados, los cuales representan alrededor del **90% del total de alumnos en Chile**.

Los alumnos beneficiados son los considerados en **situación de vulnerabilidad**, es decir, aquellos donde existe la presencia de factores de riesgo de origen biológico, psicológico, social, económico, ambiental, de género y cultural, entre otros, que afectan la calidad de vida, bienestar y capacidad de aprendizaje de los escolares.

El problema consiste en entregar raciones a lo largo del país que satisfagan las necesidades particulares de los niños, según su edad, localidad y situación de vulnerabilidad.

## Licitación de Alimentos

Hasta 1997 la asignación se realizaba usando **criterios subjetivos y rudimentarios**. Se aplicaban una serie de filtros sucesivos basados en criterios financieros y técnicos, de manera de ir descartando asignaciones, hasta obtener una solución supuestamente buena.

Por otro lado, este sistema facilitaba que se generaran **presiones indebidas** sobre los funcionarios responsables, influyendo en las decisiones.

Todo esto, sumado a la gran cantidad de opciones posibles, llevaba a **soluciones subóptimas** que, dada la gran cantidad de dinero involucrada, aumentaba notablemente los costos de JUNAEB.

## El Nuevo Proceso de Licitación

En 1997 se produjo un gran cambio en JUNAEB, el cual afectó tanto al proceso de licitación de alimentos como a la selección de los alumnos vulnerables.

El proceso de licitación fue rediseñado, uno de los principales objetivos de este rediseño era **asegurar la transparencia y objetividad del proceso**, para esto JUNAEB estableció en forma clara los requerimientos que debía tener el proyecto técnico presentado por cada empresa.

## Requerimientos

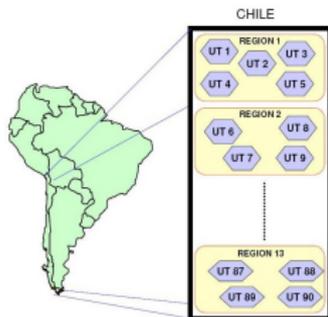
- Requerimientos nutricionales de cada ración
- Estructura alimentaria (tipo de servicio, frecuencia de determinados alimentos, etc.)
- Insumos y características mínimas de calidad
- Condiciones de operación (higiene, abastecimiento, etc.)
- Infraestructura (mobiliario, equipo, vajilla, etc.)

## Etapas del Proceso

El nuevo proceso se dividió en las siguientes etapas:

- Registro de las empresas
- Clasificación de las empresas según capacidad financiera y operativa y evaluaciones técnicas, y eliminación de empresas que no cumplen con los estándares mínimos
- Presentación de ofertas de las empresas. Éstas son codificadas de modo que, durante la selección, no se conoce la empresa que realizó cada oferta
- Eliminación de ofertas que no cumplen con los requisitos técnicos establecidos
- Evaluación económica de las ofertas a través de un modelo matemático
- Elección de las ofertas ganadoras

## Unidades Territoriales



Para realizar la licitación **el país es dividido en 90 Unidades Territoriales (UT)**, es decir, en promedio cada una de las 13 regiones del país se divide en 7 UTs. Cada año son licitadas un tercio de las unidades territoriales por un periodo de 3 años.

Las UTs son clasificadas en 2 tipos de acuerdo a la cantidad de raciones demandadas:

- BUTs: unidades territoriales de menor demanda
- AUTs: unidades territoriales de mayor demanda

A su vez, las empresas son divididas en "firmas pequeñas", aquellas que pueden ofertar sólo en BUTs, y "firmas grandes", aquellas que sólo pueden ofertar en AUTs.

## Procesos de Preparación de Raciones

A partir de 2006, es posible asignar diferentes procesos de preparación dependiendo del tipo de establecimiento. Los procesos de preparación son:

- Proceso Convencional (PC): preparación dentro de las escuelas con equipamiento tradicional
- Proceso Convencional Mejorado (PCM): preparación dentro de las escuelas utilizando equipamiento sofisticado como procesador de vegetales o baño maría
- Proceso Mixto (PM): combinación de métodos industriales en una instalación central con métodos convencionales o semi-industriales dentro de las escuelas

## Procesos de Preparación de Raciones

Los establecimientos son clasificados en 3 tipos:

- Establecimientos con hasta 400 alumnos (Tipo 1): pueden utilizar el PC, PCM o PM.
- Establecimientos con más de 400 alumnos y espacio suficiente para infraestructura adicional (Tipo 2): pueden utilizar el PCM o el PM.
- Establecimientos con más de 400 alumnos sin espacio para infraestructura adicional (Tipo 3): sólo pueden utilizar el PM.

## Las Ofertas

Cada una de las ofertas de las empresas debe incluir:

- **UTs incluídas**
- Precios para cada tipo de ración
- Precios para cada nivel de demanda

Cada empresa tiene un máximo de UTs a las que puede aspirar (1 a 8) según su clasificación.

La posibilidad de incluir más de 1 UT en cada oferta permite a las empresas tener economías de escala.

Cada oferta se acepta por completo (todas las UTs incluídas) o se rechaza.

## Las Ofertas

Cada una de las ofertas de las empresas debe incluir:

- UTs incluídas
- **Precios para cada tipo de ración**
- Precios para cada nivel de demanda

JUNAEB ha definido 168 productos distintos, éstos se clasifican en 30 tipos de raciones, caracterizadas por el número de calorías y requerimientos nutricionales específicos, para cada tipo de ración existen 3 estructuras alimentarias (combinaciones de alimentos de distinta calidad). En cada oferta, las empresas deben ofrecer un precio para cada uno de estos productos.

## Las Ofertas

Cada una de las ofertas de las empresas debe incluir:

- UTs incluídas
- Precios para cada tipo de ración
- **Precios para cada nivel de demanda**

Los precios ofertados son para la demanda estimada, sin embargo, debido a que el contrato dura 3 años, es necesario considerar otros escenarios de demanda en los que las empresas podrían verse perjudicadas.

Las empresas deben presentar precios para el caso en que la demanda disminuya bajo el 90% y el 70%. Además existe un porcentaje fijo de descuento para el caso en que la demanda supere el 104%

## Escenarios a Analizar

Para obtener la adjudicación óptima se debe realizar un **análisis de sensibilidad sobre distintos aspectos** del problema de modo de medir su influencia en las decisiones. Los escenarios a evaluar son:

- Procesos de preparación (PC, PCM y PM)
- Servicios adicionales a las raciones básicas, como por ejemplo vegetales extra
- Diferentes niveles de demanda
- Bandas de precios para eliminar ofertas con precios muy bajos ya que suelen ser poco realistas
- Concentración de proveedores. Para reducir la concentración se impone un número mínimo de firmas, tanto para las BUTs como AUTs.
- Índice de desempeño de las firmas

## Escenarios a Analizar

Un escenario queda definido por la combinación de un proceso, servicio adicional, nivel de demanda, tolerancia de la banda de precio, concentración de la industria e inclusión del índice de desempeño.

Los escenarios anteriores llevan a **más de 700 combinaciones a analizar**, sin embargo, los escenarios de interés son sólo 150 a 200 de ellos.

## Modelo Matemático

El modelo utilizado ha sido mejorado desde la licitación de 1997, a continuación se presenta el modelo del año 2006:

- **Variable de Decisión**

$$X_j \begin{cases} 1 & \text{si se acepta la oferta } j \text{ fecha } k \\ 0 & \text{si se rechaza la oferta } j \end{cases}$$

- **Variables de Auxiliares**

$$Y_{k,r} \begin{cases} 1 & \text{si la firma } k \text{ opera en la región } r \text{ fecha } k \\ 0 & \text{si no opera} \end{cases}$$

$$Z_k \begin{cases} 1 & \text{si se acepta una oferta de la firma } k \text{ fecha } k \\ 0 & \text{si no se acepta ninguna} \end{cases}$$

- **Función Objetivo**

$$\min \quad \left[ \sum_j X_j \cdot Costo_j \cdot Pond_{E(j)} \right]$$

Donde  $Pond_{E(j)}$  es un ponderador de la calificación de desempeño de la empresa a la que pertenece la oferta  $j$ . Este ponderador puede no ser incluido en la función objetivo.

## ▪ Restricciones

1. Todas las unidades territoriales deben ser cubiertas
2. Las empresas no deben sobrepasar su límite de gasto
3. Límite de empresas por región
4. Cálculo de las variables  $Y_{k,r}$ : la firma  $k$  opera en la región  $r$  si alguna de sus ofertas aceptadas incluye una UT perteneciente a esta región
5. Cantidad mínima de "firmas grandes"

6. Cantidad mínima de "firmas pequeñas"
7. Cálculo de las variables  $Z_k$
8. No sobrepasar el presupuesto de "firmas grandes" (en el caso de incluir el ponderador de desempeño en la función objetivo)
9. No sobrepasar el presupuesto de "firmas pequeñas" (en el caso de incluir el ponderador de desempeño en la función objetivo)

Modelo Completo [1]

## Técnicas Utilizadas en la Resolución

Debido a la gran cantidad de escenarios a analizar era necesario **resolver cada uno de ellos en un tiempo razonable.**

Para obtener una mejor relajación lineal del problema se utilizaron **técnicas de fortalecimiento**, agregando planos cortantes y desacoplando algunas restricciones.

Este modelo "extendido" permitió reducir las iteraciones en la etapa de ramificación y acotamiento, pero cada iteración se hizo más larga, sin embargo esta formulación fue utilizada con **buenos resultados en instancias difíciles.**

Formulación [1]

## Técnicas Utilizadas en la Resolución

A pesar que normalmente se utiliza el problema con el índice de desempeño (PYD), es necesario resolver el problema si este índice (PND) para determinar el presupuesto, el cual se define como el óptimo del PND más un **monto adicional que se está dispuesto a pagar por mejorar la calidad**.

Por otro lado, se observó que el problema para **BUTs y AUTs podía analizarse en forma separada**, lo que permitía solucionar en forma rápida el primero (problema más pequeño) y concentrarse en la AUTs.

## Técnicas Utilizadas en la Resolución

Adicionalmente, en 2006 se utilizaron **soluciones iniciales en el proceso de optimización**, lo que mejoró considerablemente los tiempos de resolución.

Para el PND se utilizó como solución inicial el óptimo de problemas donde la cantidad mínima de firmas es mayor a la requerida, mientras para el PYD se utilizó el óptimo del PND.

## Resultados Obtenidos

Una vez obtenidas las soluciones óptimas para cada uno de los escenarios JUNAEB procedió a evaluar su calidad y robustez mediante la construcción de **tablas con información estadística de cada solución**.

Las conclusiones obtenidas respecto al proceso productivo en el año 2006 fueron:

- PC para establecimientos Tipo 1
- PCM para establecimientos Tipo 2
- PM para establecimientos Tipo 3

## Resultados Obtenidos

La asignación encontrada entrega **112 millones de raciones** en cada uno de los 3 años siguientes.

Si se comparan estos resultados con las licitaciones pasadas de estas UTs se tiene un **aumento del 65% de las raciones de 2000 y del 36% de las raciones de 2003.**

## Impacto

La utilización de un modelo matemático para la licitación de raciones alimenticias trajo **múltiples beneficios** a JUNAEB:

- Una mejora sustancial de la **calidad de los aportes nutricionales, estructura alimentaria infraestructura y condición laboral de las manipuladoras** en las escuelas debido a los nuevos requerimientos hechos a las empresas
- Ahorros de aproximadamente **US\$40 millones** en los 3 años que dura la licitación (equivalente a la alimentación de 115.000 niños)
- **Alto nivel de satisfacción** de los estudiantes respecto a la calidad de la alimentación
- **Aumento de la cobertura** , a pesar de una disminución en el presupuesto

## Impacto

Los logros obtenidos se deben principalmente a:

- **Objetividad y transparencia** en el proceso
- Empresas deben competir en calidad y bajos precios, por lo que deben **aumentar su eficiencia y productividad**
- El modelo permite ofertas que incluyen varias UTs lo que hace posible **aprovechar las economías de escala**
- Posibilidad de analizar un **gran número de escenarios y ofertas** encontrando la solución óptima en poco tiempo
- Utilización de tablas de información estadística que **resumen los resultados encontrados por el modelo**

## Impacto

Dados los buenos resultados obtenidos JUNAEB utiliza el sistema desde 1997 hasta el día de hoy, siendo mejorado constantemente. Esto lo ha llevado a ser **promovido internacionalmente** como un modelo de programa de alimentación escolar.

La misma metodología ha sido utilizada por JUNAEB en las licitaciones de lentes ópticos para los estudiantes.

## Publicaciones



Epstein R., Catalán J., *"Using mathematical models in negotiation and auction processes"*, INFORMS Fall Meeting Philadelphia (1999)



Epstein R., Henríquez L., Catalán J., Weintraub G., Martínez C., *"Programación Entera Mejora el Proceso de Licitación de Raciones Alimenticias"*, RIS 15 (2001), 13-30



Epstein R., Henríquez L., Catalán J., Weintraub G.Y., Martínez C., *"A combinatorial auction improves school meals in Chile"*, Interfaces 32 (2002), 1-14

---

INTERNATIONAL  
TRANSACTIONS  
IN OPERATIONAL  
RESEARCH

---

Epstein R., Henríquez L., Catalán J., Weintraub G., Martínez C., Espejo F., *"A combinatorial auction improves school meals in Chile: A case of OR in developing countries"*, International transactions in operational research 11 (2004), 593-612

# Programación Entera Mejora la Licitación de Raciones Alimenticias en Chile

Para mayor información: <http://www.dii.uchile.cl/cgo>

# Anexos

## Anexo 1: Modelo Matemático Completo

- **Variable de Decisión**

$$X_j \begin{cases} 1 & \text{si se acepta la oferta } j \text{ fecha } k \\ 0 & \text{si se rechaza la oferta } j \end{cases}$$

- **Variable de Auxiliar**

$$Y_{k,r} \begin{cases} 1 & \text{si la firma } k \text{ opera en la región } r \text{ fecha } k \\ 0 & \text{si no opera} \end{cases}$$

[Volver \[4\]](#)

- **Función Objetivo**

$$\min \quad \left[ \sum_j X_j \cdot Costo_j \cdot Pond_{E(j)} \right]$$

Donde  $Pond_{E(j)}$  es un ponderador de la calificación de desempeño de la empresa a la que pertenece la oferta  $j$ . Este ponderador puede no ser incluido en la función objetivo.

Volver [4]

## ▪ Restricciones

1. Todas las unidades territoriales deben ser cubiertas

$$\sum_{j:i \in UT_j} X_j \geq 1 \quad \forall i \in UT$$

$UT_j$ : unidades territoriales incluidas en la oferta  $j$

2. Las empresas no deben sobrepasar su límite de gasto

$$\sum_{j:k \in E_j} X_j \cdot Costo_j \leq MaxGasto_k \quad \forall k \in Empresas$$

$E_j$ : empresa que presenta la oferta  $j$

[Volver \[4\]](#)

### 3. Límite de empresas por región

$$\text{MinEmp}_r \leq \sum_{k \in \text{Empresas}} Y_{k,r} \leq \text{MaxEmp}_r \quad \forall r \in \text{Regiones}$$

4. Cálculo de las variables  $Y_{k,r}$ : la firma  $k$  opera en la región  $r$  si alguna de sus ofertas aceptadas incluye una UT perteneciente a esta región

$$Y_{k,r} \leq \sum_{j: k \in \text{Of}_j} X_j \quad \forall k \in \text{Empresas}, r \in \text{Regiones}$$

$$\sum_{j: k \in \text{Of}_{k,r}} X_j \leq |\text{Of}_{k,r}| \cdot Y_{k,r} \quad \forall k \in \text{Empresas}, r \in \text{Regiones}$$

$\text{Of}_{k,r}$ : ofertas presentadas por la empresa  $k$  en la región  $r$

[Volver \[4\]](#)

## 5. Cantidad mínima de "firmas grandes"

$$\sum_{k \in \text{FirmasGrandes}} Z_k \geq \text{MinGrandes}$$

## 6. Cantidad mínima de "firmas pequeñas"

$$\sum_{k \in \text{FirmasPeq}} Z_k \geq \text{MinPeq}$$

7. Cálculo de las variables  $Z_k$ 

$$Z_k \leq \sum_{r \in \text{Regiones}} Y_{k,r} \quad \forall k \in \text{Empresas}$$

$$\sum_{r \in \text{Regiones}} Y_{k,r} \leq |\text{Regiones}| \cdot Z_k \quad \forall k \in \text{Empresas}$$

[Volver \[4\]](#)

8. No sobrepasar el presupuesto de "firmas grandes" (en el caso de incluir el ponderador de desempeño en la función objetivo)

$$\sum_{j: E_j \in \text{FirmasGrandes}} \text{Costo}_j \cdot X_j \leq \text{PresupuestoFGrandes}$$

9. No sobrepasar el presupuesto de "firmas pequeñas" (en el caso de incluir el ponderador de desempeño en la función objetivo)

$$\sum_{j: E_j \in \text{FirmasPeq}} \text{Costo}_j \cdot X_j \leq \text{PresupuestoFPeq}$$

Volver [4]

## Anexo 2: Técnicas de Fortalecimiento

### 1. Planos cortantes redundantes con el conjunto de restricciones 2

$$\sum_{j \in V(k)} X_j \leq |V(k)| - 1 \quad \forall k \in \text{Empresas}$$

### 2. Desacoplar restricción 4.2

$$X_j \leq Y_{k,r} \quad \forall j : E_j = k, k \in \text{Empresas}, r \in \text{Regiones}$$

[Volver \[1\]](#)

## Anexo 3: Impacto

| <b>Aportes Nutricionales - Nutrientes (Ración B700)</b> |                                |
|---|--------------------------------|
| <b>Licitación 1995</b>                                  | <b>Licitación 1999</b>         |
| Grasas: máximo 30%                                      | Grasas: máximo 10%             |
| Sacarosa: No especificada                               | Sacarosa: Límite máximo 25 gr* |
| Vitamina C: 19,8 mg                                     | Vitamina C: 45 mg*             |
| Calcio: 264 mg  | Calcio: 400 mg*                |

\* de acuerdo a recomendaciones dietarias

| <b>Estructura Alimentaria</b>   |   |
|---|---|
| <b>Licitación 1995</b>  | <b>Licitación 1999</b>  |
| Lácteos: 1 vez por semana leche al 50%<br>4 veces por semana sustituto lácteo<br>con 30% de leche | Lácteos: 4 vez por semana leche al 50%<br>1 vez por semana sustituto lácteo<br>con 30% de leche |
| Carneos: 4 veces por mes carne molida (20 gr)   | Carneos: 6 veces por mes carne 6 (40 gr)  |
| Fruta: 4 veces por mes  | Fruta: 6 frutas frescas por mes más 2 en<br>conserva o deshidratada                             |
| Ensalada: opcional  | Ensalada: 6 veces por mes (60 gr)   |
| Pan: opcional   | Pan: 3 veces por semana en desayuno   |
| Galletas: opcional  | Galletas: 1 o 2 veces por semana  |

| <b>Infraestructura</b>   |
|--|
| <b>Principal infraestructura adicional en las escuelas sobre el año 2005</b> |
| Refrigerador / Congelador  |
| Campana de Extracción  |
| Lavaplatos de acero inoxidable/enlozado                                      |
| Luminarias   |
| Vajilla nueva al inicio del programa   |

| <b>Situación Manipuladoras</b>  |
|---|
| <b>Aspectos en que mejora la situación de las manipuladoras respecto a 1995</b>                                     |
| Salarios se incrementan en términos reales en 41,5%   |
| Todos tienen bonos imponibles   |
| Se exige trimestralmente certificado de Inspección del Trabajo de situación al día en materia laboral y previsional |

[Volver \[1\]](#)