

DEIOAC-UPV

### 3. Métodos de Programación Lineal (I)



# Objetivos

---

Al finalizar el tema, deberás ser capaz de:

- Conocer e identificar las características de un problema de Programación Lineal.
- Resolver gráficamente modelos lineales con dos variables.
- Analizar la sensibilidad de la solución óptima a cambios en los datos de entrada del modelo.
- Expresar en forma estándar un problema lineal.
- Conocer y saber manejar los términos básicos relacionados con la Programación Lineal: solución básica, variables básicas, coste reducido, coste de oportunidad, etc.
- Conocer los fundamentos del algoritmo Simplex.
- Resolver problemas lineales mediante el algoritmo Simplex.
- Identificar e interpretar la información correspondiente a la solución óptima obtenida mediante el algoritmo Simplex.
- Interpretar los informes de solución óptima y análisis de sensibilidad obtenidos con software de optimización.

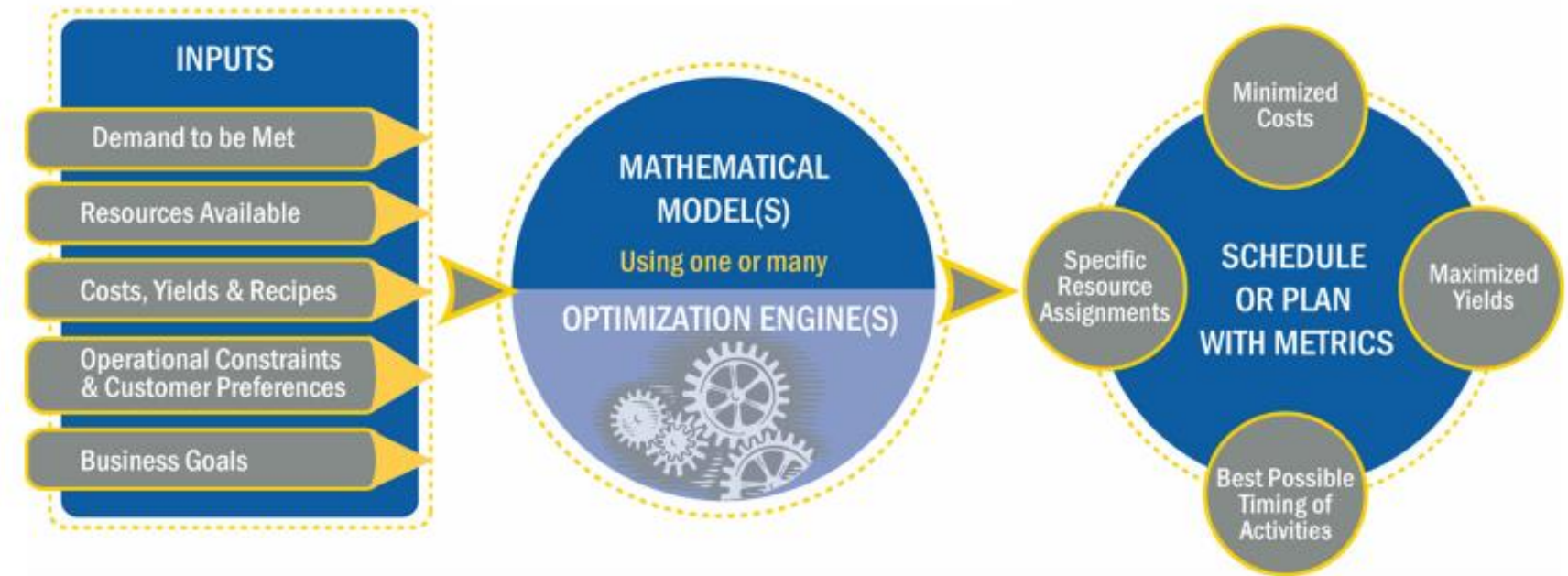
# CONTENIDOS

---

- 3.1 Introducción
- 3.2 Región factible y solución gráfica
- 3.3 Variables de holgura
- 3.4 Análisis de sensibilidad
- 3.5 Resolución de modelos con el software de optimización LINGO®
- 3.6 Conceptos básicos de Programación Lineal
- 3.7 Algoritmo Simplex: conceptos básicos
- 3.8 Algoritmo Simplex en forma de tablas
- 3.9 Algoritmo Simplex revisado
- 3.10 Algoritmo Simplex Dual

## 3.1 Introducción

- ▶ Los sistemas de toma de decisiones basados en optimización tienen una arquitectura bien definida como se muestra en el siguiente gráfico:



## 3.1 Introducción

---

**¿Qué características ha de tener un *modelo* para ser de Programación Lineal?**

**¿Cómo se obtiene la *Solución Óptima* de un modelo de Programación Lineal?**

## 3.1 Introducción

---

- ▶ **Programación Lineal:** es uno de los métodos más poderosos y flexibles para el análisis cuantitativo.
- ▶ Se utiliza en todo tipo de organizaciones diariamente para resolver gran variedad de problemas:
  - ▶ planificación de la producción,
  - ▶ problemas de mezclas,
  - ▶ gestión de personal,
  - ▶ gestión de inventarios,
  - ▶ gestión de rutas de vehículos,
  - ▶ corte de materias primas,
  - ▶ ...

## 3.1 Introducción

---

- ▶ Hemos visto una variedad de problemas decisionales que pueden ser formulados y analizados como problemas de programación lineal. El siguiente paso es, una vez modelizado como un programa lineal, **cómo resolverlo para encontrar una solución óptima?**
- ▶ La solución más sencilla es hacer **‘click en el botón Resolver’** de un optimizador.... Pero,

**Necesitamos saber algo más de lo que ocurre al pulsar el botón ‘Resolver’**

## 3.1 Introducción

---

- ▶ Razones para adquirir algunos conocimientos básicos sobre los procedimientos de solución:
  1. Incrementar la confianza en la validez y potencia de estos algoritmos
  2. Comprender el significado de la información contenida en los informes de solución
  3. Comprender el significado de algunos resultados no muy frecuentes al resolver estos problemas (e.g. el problema no tiene solución, la solución es no acotada).



## 3.1 Introducción

---

### » UN PROBLEMA DE PRODUCCIÓN

- ▶ Una empresa de producción de componentes informáticos dispone de 3 departamentos. La fabricación de los componentes se hace en el departamento 1 (**producción**), el test de los mismos se realiza en el departamento 2 (**control de calidad**) y en el departamento 3 (**montaje**) se realiza el ensamblado
- ▶ Debido a la disminución en los beneficios, la gerencia ha decidido reorganizar la producción de la empresa

## 3.1 Introducción

---

- ▶ Se interrumpirá la producción de componentes no rentables para comenzar la producción de dos nuevas placas base
  - ▶ **Placa base 1** (más sencilla, se testea en el departamento de producción)
  - ▶ **Placa base 2** (fabricada por otra empresa)
- ▶ La placa base 1 requiere parte de la capacidad de producción en los departamentos 1 y 3 y nada en el departamento 2
- ▶ La placa base 2 sólo necesita trabajo en los departamentos 2 y 3

## 3.1 Introducción

---

- ▶ La compañía puede vender todas las placas base que se puedan fabricar
- ▶ Cada placa base se fabricará en **lotes de 50 placas**
- ▶ Capacidad productiva de los departamentos y requerimientos de cada lote:

	Tiempo de producción (h/lote)		
	PRODUCTO		
Departamento	Placa 1	Placa 2	Tiempo de producción disponible (h/semana)
1 (Producción)	1	0	4
2 (Calidad)	0	2	12
3 (Montaje)	3	2	18

## 3.1 Introducción

---

- ▶ Teniendo en cuenta la capacidad de producción de los departamentos y que el beneficio por lote es 3000 y 5000 € respectivamente,

¿Cuál es la producción que maximiza el beneficio total de la compañía?

## 3.1 Introducción

---

### ► VARIABLES:

Las variables decisión del problema son:

**X1**: Número de lotes de la placa base 1 fabricados por semana

**X2**: Número de lotes de la placa base 2 fabricados por semana

## 3.1 Introducción

---

### ► **HIPÓTESIS 1 DE PROGRAMACIÓN LINEAL: *DIVISIBILIDAD***

***Todas las variables pueden asumir cualquier valor real***

- Si las variables solo tienen sentido en el caso de tomar valores discretos **pero** toman un **valor real elevado** (superior a 10) en la solución óptima, es aceptable considerarlas como continuas y redondear su valor

## 3.1 Introducción

---

### ► **HIPÓTESIS 2 DE PROGRAMACIÓN LINEAL: *CONDICIONES DE NO NEGATIVIDAD***

***Todas las variables son no negativas***

- Si  $X_i \leq 0$ 
  - Sustituir en el modelo  $X_i$  por  $X_i' = -X_i$ ;  $X_i' \geq 0$
  - Cuando se obtenga la solución óptima se deshace el cambio
- Si  $X_i$  no restringida en signo
  - Indicar que  $X_i = X_{i1} - X_{i2}$ ;  $X_{i1}, X_{i2} \geq 0$
  - Sustituir en el modelo  $X_i$  por  $(X_{i1} - X_{i2})$
  - Cuando se obtenga la solución óptima se deshace el cambio

## 3.1 Introducción

---

### ► FUNCIÓN OBJETIVO:

Placas Base	Beneficio por lote (€)	Lotes fabricados por semana	Beneficio por semana
Tipo 1	3000	$X_1$	$3000 X_1$
Tipo 2	5000	$X_2$	$5000 X_2$
<b>Beneficio Total = <math>3000 X_1 + 5000 X_2 = Z</math></b>			



## 3.1 Introducción

---

- Teniendo en cuenta la capacidad productiva de los departamentos y requerimientos de cada lote:

	Tiempo de producción (h/lote)		
	PRODUCTO		
Departamento	Placa 1	Placa 2	Tiempo de producción disponible (h/semana)
1 (Producción)	1	0	4
2 (Calidad)	0	2	12
3 (Montaje)	3	2	18

- ... RESTRICCIONES

## 3.1 Introducción

---

### ► RESTRICCIONES:

Capacidad de los departamentos

$$X_1 \leq 4 \quad \text{(Departamento 1)}$$

$$2 X_2 \leq 12 \quad \text{(Departamento 2)}$$

$$3 X_1 + 2 X_2 \leq 18 \quad \text{(Departamento 3)}$$

## 3.1 Introducción

---

### ▶ **HIPÓTESIS 3 DE PROGRAMACIÓN LINEAL: LINEALIDAD**

*Todas las relaciones entre variables son lineales*

#### ▶ **Proporcionalidad de las contribuciones**

- ▶ La contribución individual de cada variable es estrictamente proporcional a su valor; y el factor de proporcionalidad es constante para toda la gama de valores que la variable puede asumir

#### ▶ **Aditividad de las contribuciones**

- ▶ La contribución total de las variables es igual a la suma de las contribuciones individuales, sea cual sea el valor de las variables

## 3.1 Introducción

---

### Formulación del programa lineal

Determinar los valores de las variables:

$$X_1 \geq 0 \text{ y } X_2 \geq 0$$

que optimicen, maximicen en este caso (en otros puede ser minimizar) la ***función objetivo***:

$$\text{Max } 3 X_1 + 5 X_2 \text{ (miles euros)}$$

y verifiquen las ***restricciones***:

$$X_1 \leq 4$$

(Departamento 1)

$$2 X_2 \leq 12$$

(Departamento 2)

$$3 X_1 + 2 X_2 \leq 18$$

(Departamento 3)

## 3.1 Introducción

---

### Formulación general de un programa lineal

Determinar los valores de las *variables decisión*

$$X_j \geq 0 \text{ para } j = 1, 2, \dots, n$$

que optimicen (max o min) la *función objetivo*

$$\text{MAX } \sum C_j X_j \quad (\text{MAX } Z \equiv \text{MIN } (-Z))$$

con la condición

$$\sum a_{ij} X_j \leq, =, \geq b_i \quad i=1, 2, \dots, m$$

Donde

- ▶ **n**: número de variables
- ▶ **m**: número de restricciones ( $=, \leq$  o  $\geq$ )
- ▶ Los  **$c_j$** ,  **$a_{ij}$**  y  **$b_i$**  son los parámetros del modelo

## 3.1 Introducción

---

### ► **HIPÓTESIS 4 DE PROGRAMACIÓN LINEAL: CERTIDUMBRE**

*Se asume que todos los parámetros del modelo  $c_j$ ,  $a_{ij}$  y  $b_i$  son constantes conocidas*

## 3.1 Introducción

---

### MÉTODOS DE RESOLUCIÓN DE PL

- ▶ **Método gráfico** (problemas con dos variables).
- ▶ **Método Simplex** (George Dantzig, 1947).
- ▶ **Algoritmo del Punto Interior (API;** Narendra Karmarkar, 1984).

El **API** sólo supera al Simplex en problemas muy grandes.

## 3.2 Región factible y solución gráfica

---

### ► SOLUCIÓN POSIBLE

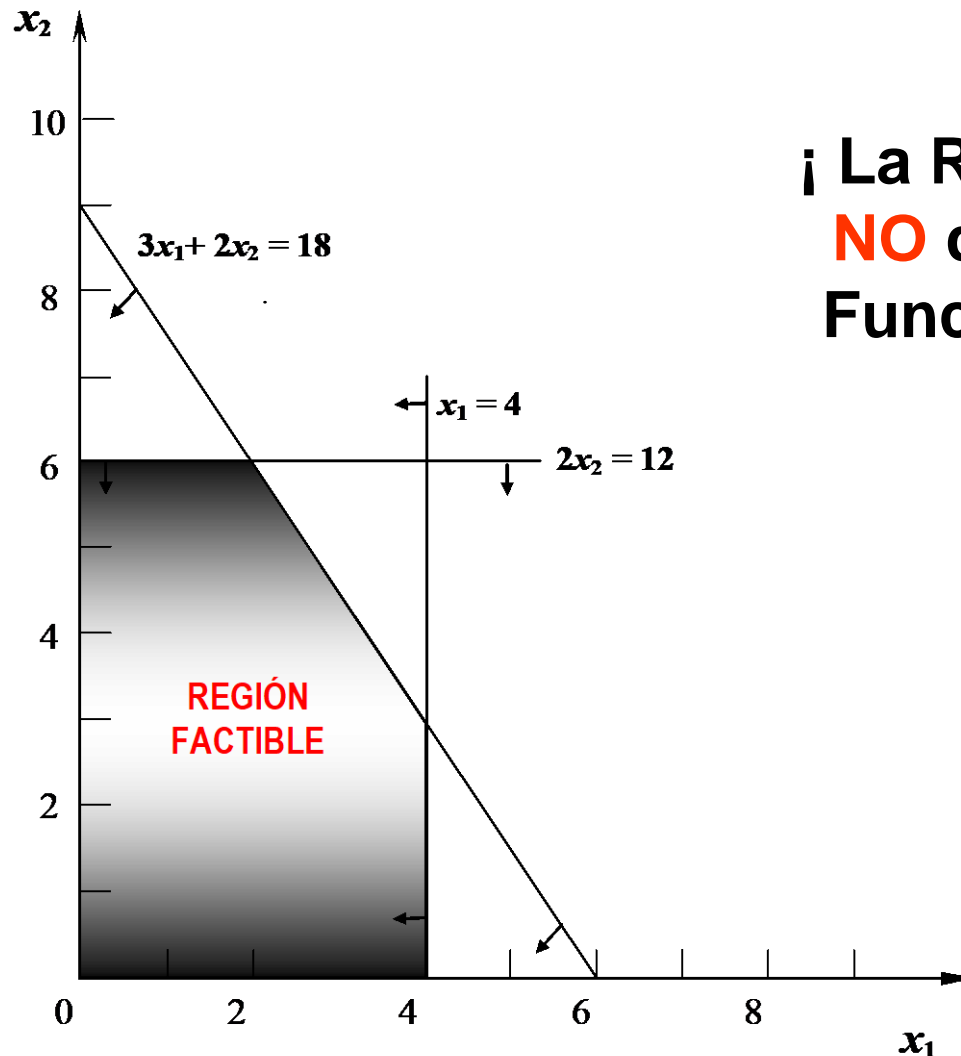
- Combinación de valores de las variables que satisface **simultáneamente todas** las restricciones

### ► REGIÓN FACTIBLE

- Conjunto de todas las soluciones posibles (C.S.P.)



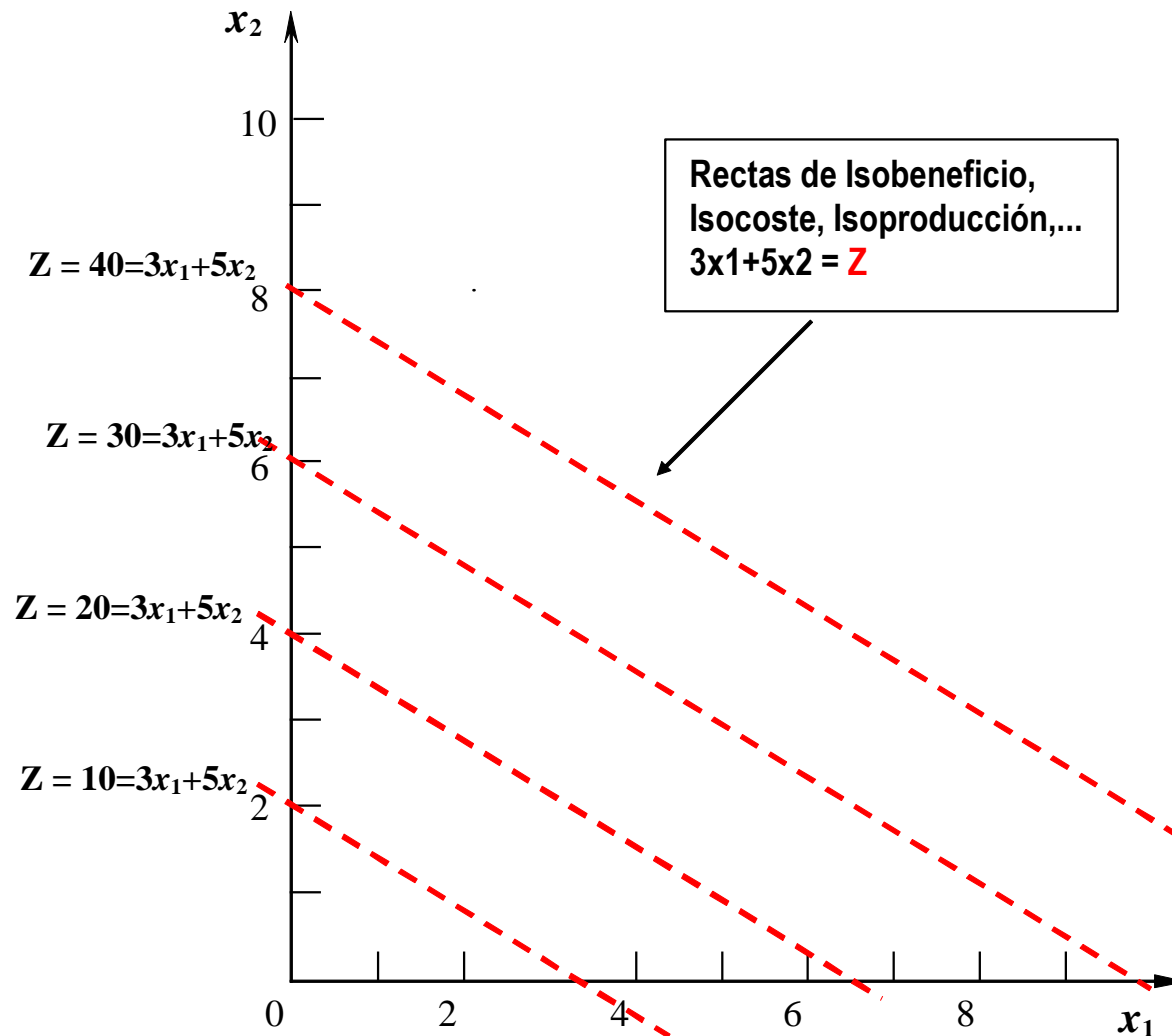
## 3.2 Región factible y solución gráfica



¡ La Región Factible  
**NO** depende de la  
Función Objetivo !

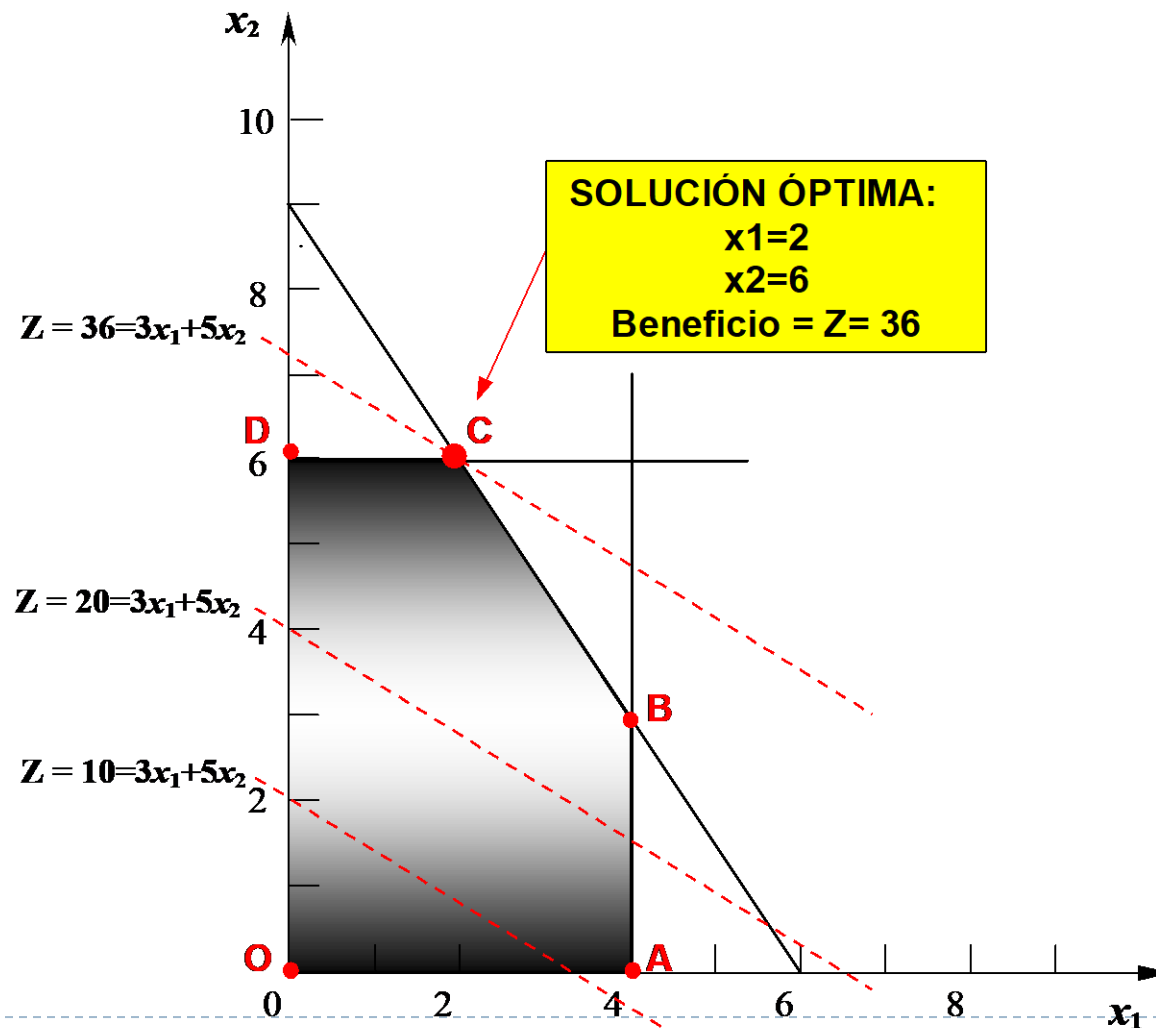
## 3.2 Región factible y solución gráfica

### FUNCIÓN OBJETIVO



## 3.2 Región factible y solución gráfica

### SOLUCIÓN GRÁFICA: MAXIMIZAR BENEFICIO



## 3.2 Región factible y solución gráfica

---

### Ejercicio Propuesto:

- Teniendo en cuenta que el coste de cada lote de placas tipo 1 es de 6.000€ y 2.000€ en el caso de las placas de tipo 2, si el objetivo fuera **minimizar los costes semanales** ¿cuál es la solución óptima?
- Calcula la solución óptima teniendo en cuenta que se desea **minimizar los costes y satisfacer una demanda de al menos 2 lotes de placas tipo 2.**

## 3.2 Región factible y solución gráfica

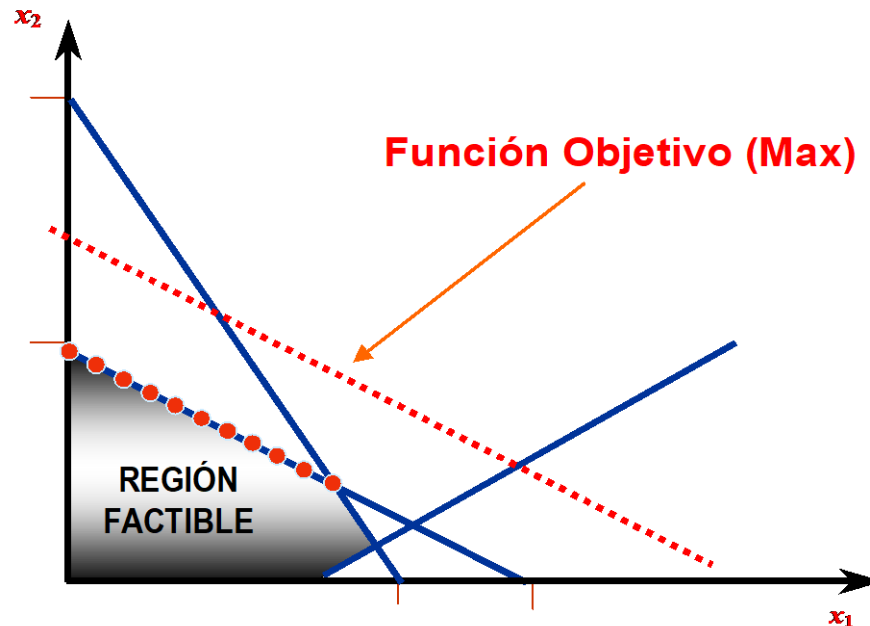
---

Pasos para llevar a cabo la resolución gráfica:

1. Dibujar la recta «frontera» de cada restricción.
2. Para cada restricción de desigualdad, determinar en qué parte de la «frontera» están los puntos que cumplen la restricción.
3. La región factible son los puntos que cumplen TODAS y cada una de las restricciones simultáneamente, incluida la condición de no negatividad.
4. La solución óptima, si existe, se encuentra en (al menos) uno de los vértices o «picos» de la región factible. Es posible deducir el/los vértice/s óptimo/s dibujando la pendiente de la función objetivo. Alternativamente: si no hay muchos vértices, podemos ir comprobando en cada uno de ellos el valor de la función objetivo.
5. Atención a los casos especiales (véase a continuación).

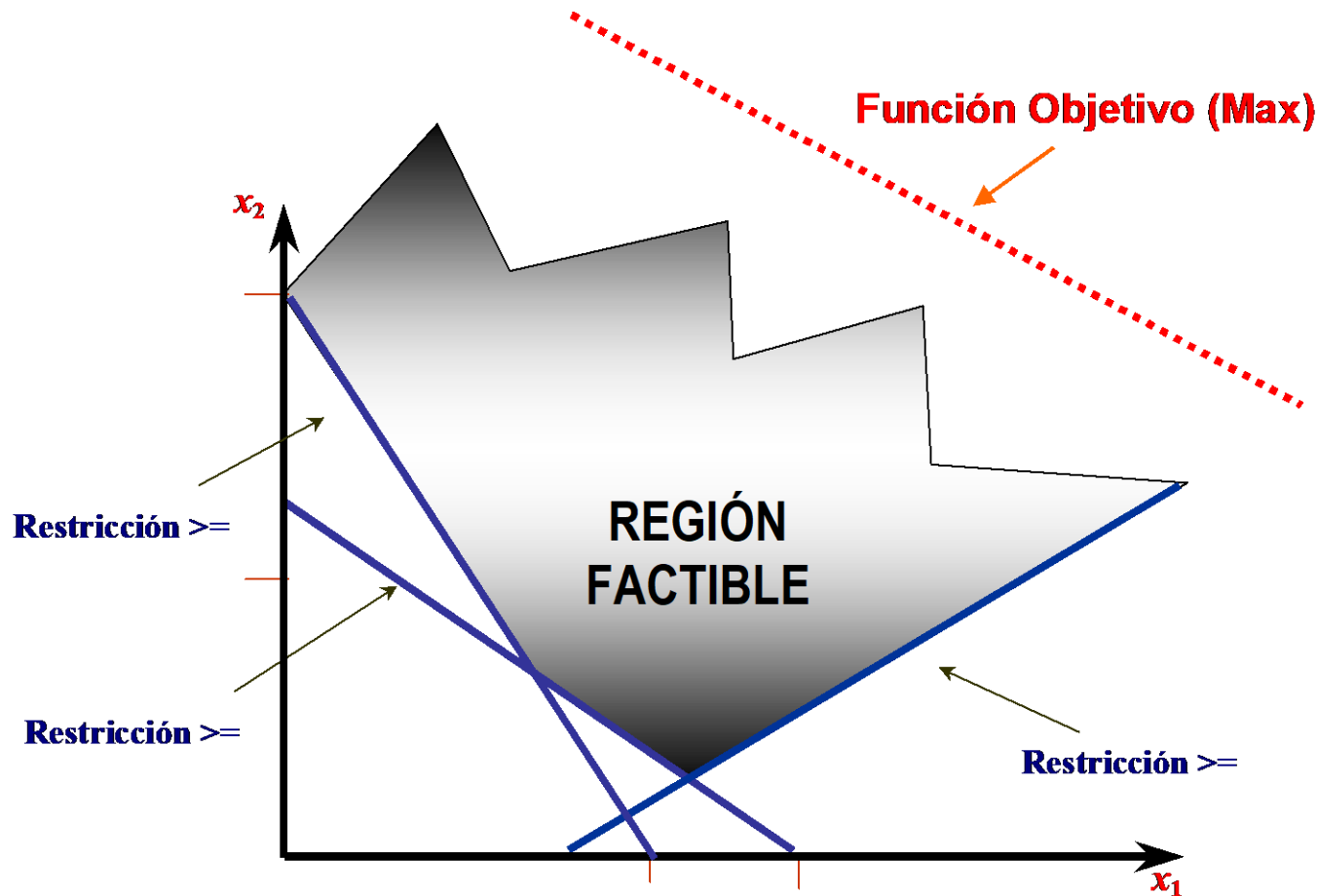
## 3.2 Región factible y solución gráfica

- ▶ **Al resolver un programa lineal podemos encontrarnos con cuatro casos**
  1. **Solución única** (el problema de planificación de la producción en la empresa de componentes informáticos)
  2. **Soluciones alternativas** (infinitas soluciones)



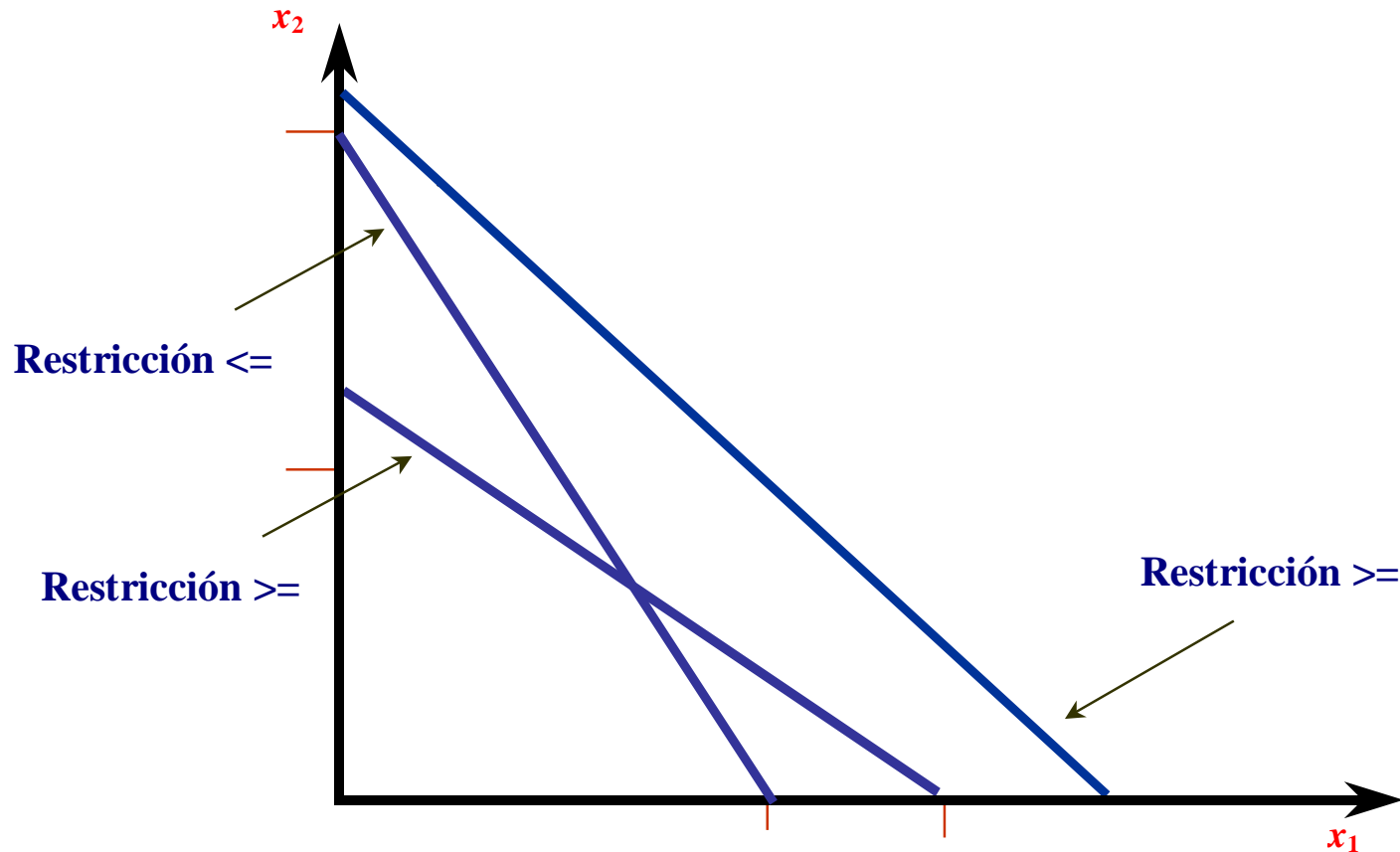
## 3.2 Región factible y solución gráfica

### 3. Solución no acotada



## 3.2 Región factible y solución gráfica

### 4. No hay solución





## 3.3 Variables de holgura

---

### FORMA ESTÁNDAR DE UN PROBLEMA LINEAL (PL)

Un PL está en forma estándar si cumple:

- Todas las restricciones son igualdades.
- Todas las variables son de naturaleza no negativa.

Cómo pasar a forma estándar cualquier PL:

- Desigualdades: añadir variables de holgura.
- Variables: aplicar equivalencias. (*vistas en las Hipótesis de PL*)

Todo PL puede expresarse en forma estándar.

### 3.3 Variables de holgura

---

## FORMA ESTÁNDAR DE UN PROBLEMA LINEAL (PL)

Un PL está en forma estándar si cumple:

- Todas las restricciones son igualdades.
- Todas las variables son de naturaleza no negativa.

Cómo pasar a forma estándar cualquier PL:

- Desigualdades: añadir variables de holgura.
- Variables: aplicar equivalencias. (*vistas en las Hipótesis de PL*)

Todo PL puede expresarse en forma estándar.

## 3.3 Variables de holgura

---

### VARIABLES DE HOLGURA

#### ► Holgura

Ante una solución posible, **diferencia** entre el **valor** que toma la **restricción** y el coeficiente del **segundo miembro**

#### ► Variable de holgura

Con frecuencia, resulta interesante identificar de una forma explícita esta diferencia introduciendo en la restricción una variable

Estas variables están sujetas a las mismas consideraciones de divisibilidad y no negatividad que las variables decisión

### 3.3 Variables de holgura

**MODELO EN FORMA  
GENERAL**



**MODELO EN FORMA  
ESTANDAR**

$$X_1 + X_3 = 4$$

(depto.1)

$$2 X_2 + X_4 = 12$$

(depto.2)

$$3 X_1 + 2 X_2 + X_5 = 18$$

(depto.3)

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \longrightarrow \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + \mathbf{x}_{\text{holgura}} = b_i$$

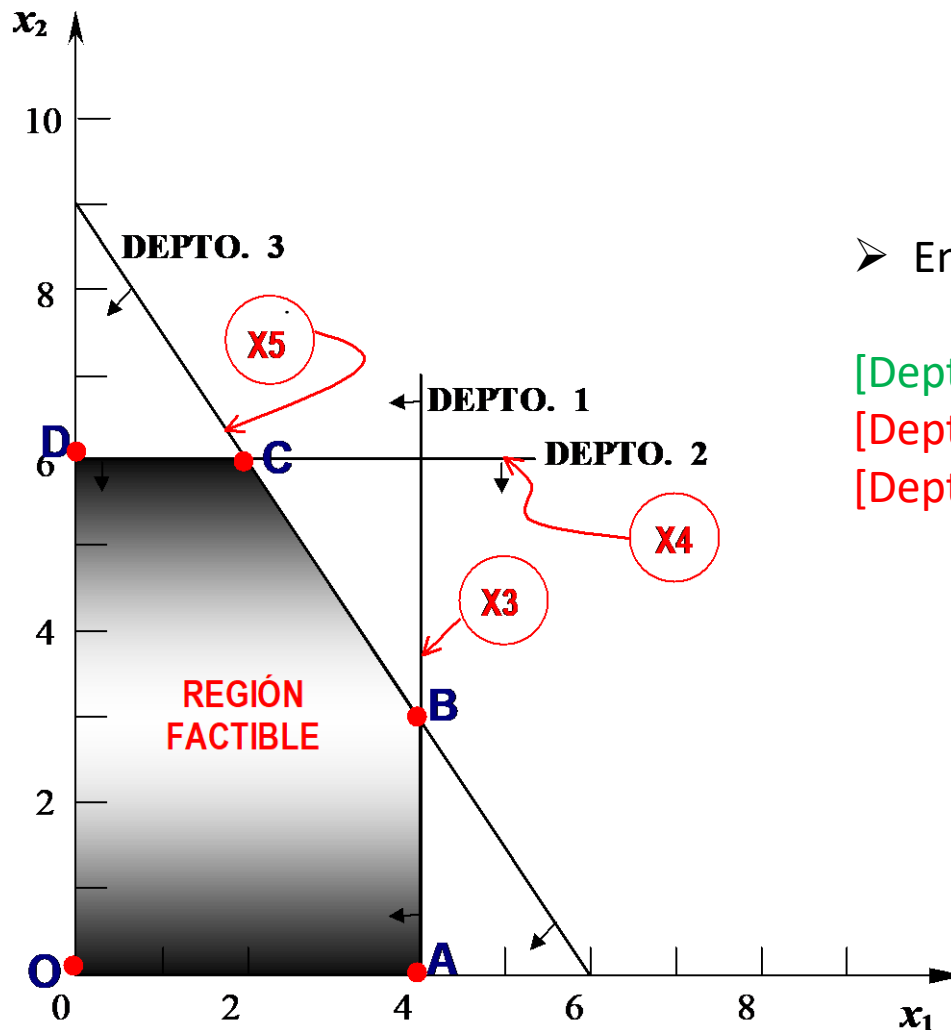
$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i \longrightarrow \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j - \mathbf{x}_{\text{exceso}} = b_i$$

## 3.3 Variables de holgura

---

- Interpretación de las variables de holgura (dada una solución)
  - **=0**: Restricción **Limitativa**  
(Cuello de botella del sistema)
  - **>0**: Recursos no utilizados o capacidad no utilizada

### 3.3 Variables de holgura



➤ En la solución óptima (C):

[Depto1] Es un recurso sobrante

[Depto2] Es cuello de botella

[Depto3] Es cuello de botella

## 3.4 Análisis de sensibilidad

---

- En **Programación Lineal**: los coeficientes del modelo son datos de entrada (parámetros fijos del modelo)
- En problemas reales:
  - Los coeficientes del modelo no están (en general) perfectamente fijados ya que dependen de parámetros no controlables y no pueden predecirse con exactitud
  - Resulta interesante estudiar **cómo varía la solución óptima o el plan de producción si cambia algún parámetro de entrada**

## 3.4 Análisis de sensibilidad

---

- Cada variación de los parámetros del modelo generará un nuevo programa lineal
- El **ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD** (A.S.) proporciona herramientas para el cálculo de las soluciones óptimas y el plan de producción de los problemas resultantes tras la modificación de los parámetros originales del problema, SIN RESOLVER DE NUEVO EL MODELO
  - A.S. COEFICIENTES DE LA FUNCIÓN OBJETIVO ( $C_i$ )
  - A.S. VECTOR RECURSOS ( $b_i$ )

Aprenderemos a deducirlo/razonarlo gráficamente, y más adelante lo veremos también en prácticas, con la ayuda de LINGO®.



## 3.4 Análisis de sensibilidad

### ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE $C_i$

- **Observación:** La modificación del coeficiente de una variable en la función objetivo implica **cambiar la pendiente de la función objetivo**
- Si el cambio es suficientemente grande habrá cambio de solución óptima

#### **OBJETIVO:**

Determinar el intervalo de variación de  $C_i$  dentro del cual la **solución óptima** o **plan óptimo de producción** (valor de las variables decisión y de holgura) **NO CAMBIA**.

El valor óptimo de la función objetivo **puede** cambiar

## 3.4 Análisis de sensibilidad

---

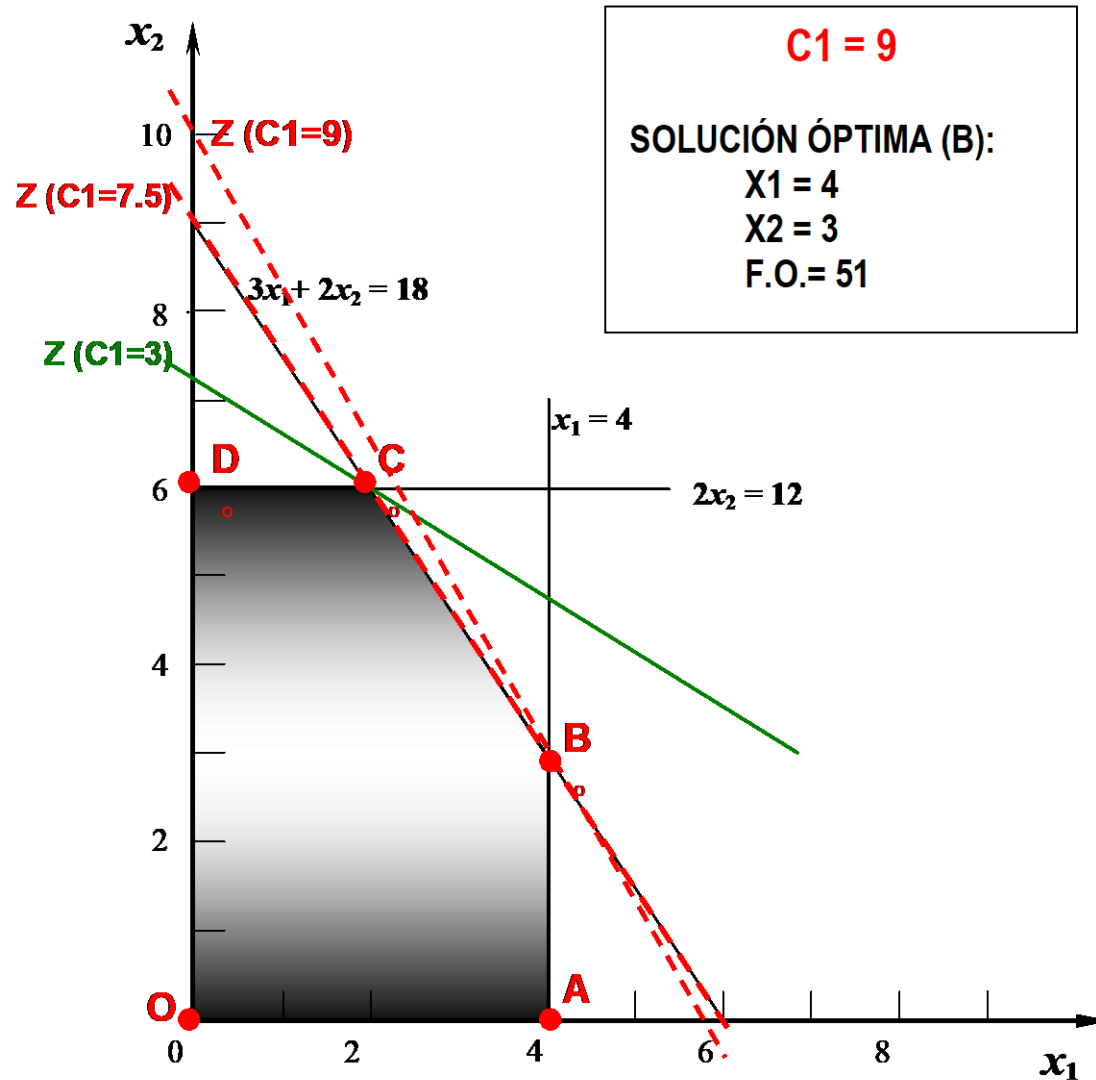
### ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE $C_i$

#### ■ EJEMPLO

- ❑ El departamento comercial había estimado incorrectamente el beneficio asociado a cada lote de placas tipo 1 que es 9000€ en lugar de 3000€ (manteniéndose el resto de coeficientes con sus valores anteriores)
- ❑ La FO será:  $\text{MAX } Z = 9 * X_1 + 5 * X_2$

**¿HABRÁ CAMBIADO LA SOLUCIÓN ÓPTIMA?**

## 3.4 Análisis de sensibilidad



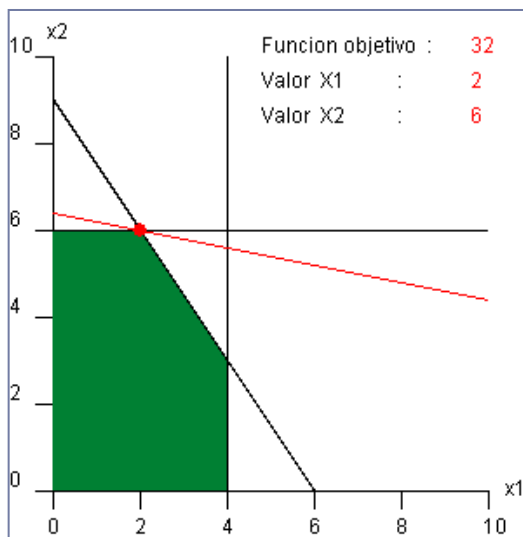
## 3.4 Análisis de sensibilidad

---

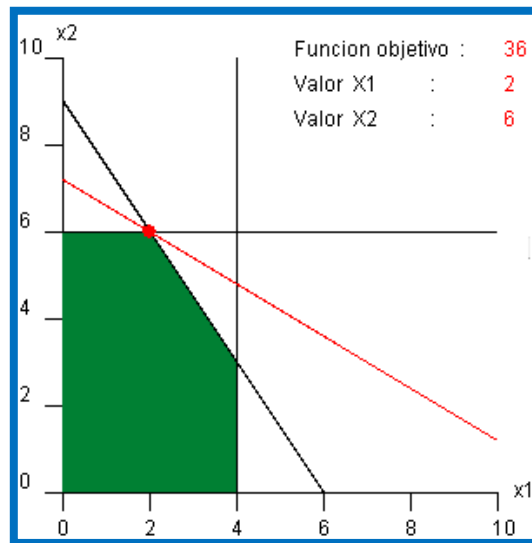
- ▶ **Gráficamente, ¿cuándo se mantendrá la solución óptima inalterada?**

## 3.4 Análisis de sensibilidad

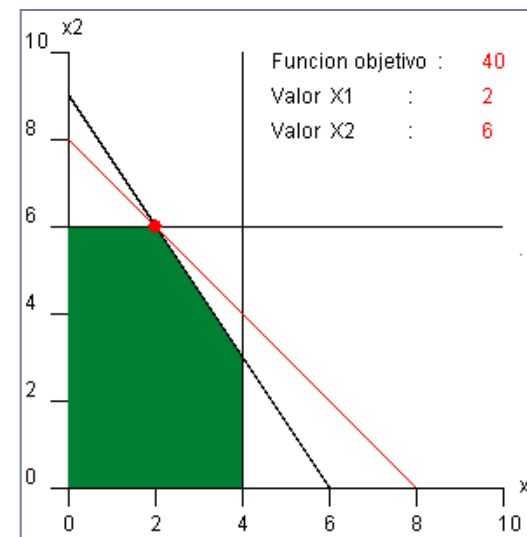
### Modelo Original



$$\text{MAX } Z = 1x_1 + 5x_2$$



$$\text{MAX } Z = 3x_1 + 5x_2$$



$$\text{MAX } Z = 5x_1 + 5x_2$$

↓  $C_{x1}$  en 2

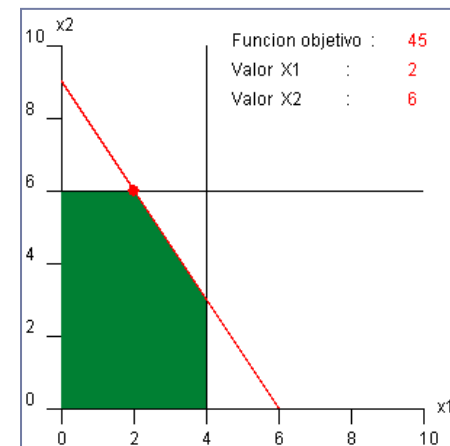
↑  $C_{x1}$  en 2

## 3.4 Análisis de sensibilidad

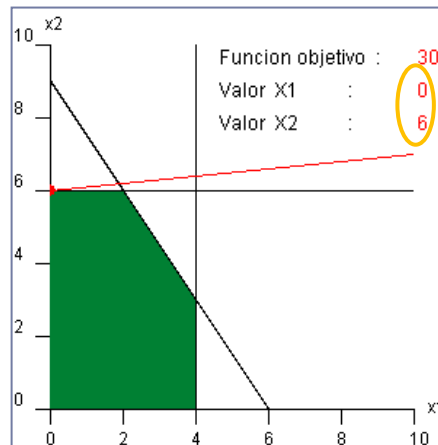


$$\text{MAX } Z = 0 X_1 + 5 X_2$$

Límites  
ANÁLISIS  
DE  
SENSIBILIDAD

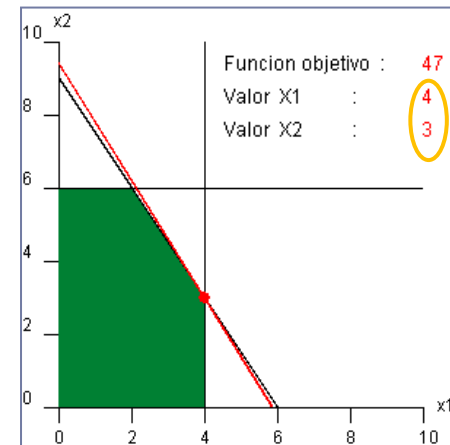


$$\text{MAX } Z = 7.5 X_1 + 5 X_2$$



$$\text{MAX } Z = -0.5 X_1 + 5 X_2$$

FUERA DE  
Límites  
ANÁLISIS  
DE  
SENSIBILIDAD



$$\text{MAX } Z = 8 X_1 + 5 X_2$$

## 3.4 Análisis de sensibilidad

---

### ■ CONCLUSIONES

- En el intervalo de análisis de sensibilidad  **$C1 \in [0, \dots, 7.5]$** :
  - la **solución óptima NO CAMBIA**, solución óptima en punto C ( $X1=2$ ,  $X2=6$ )
  - **SÍ CAMBIA** el **VALOR DE LA FUNCIÓN OBJETIVO** (se puede recalcular su valor exacto)
  - Para los **valores extremos del intervalo**, existen soluciones alternativas (por tanto, **infinitas soluciones**) todas con el mismo valor de la función objetivo

## 3.4 Análisis de sensibilidad

---

### Ejercicio propuesto:

- A partir del análisis de sensibilidad para  $C_1$  que acabamos de calcular, indica el valor de una solución óptima así como el valor de la función objetivo cuando  $C_1=0$ .
- Calcula el intervalo de Análisis de Sensibilidad para  $C_2$  (suponiendo que el resto de parámetros del modelo son los del problema original).

[Ver Applet](#)



## 3.4 Análisis de sensibilidad

### ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE $b_i$

**COSTE DE OPORTUNIDAD** de una **RESTRICCIÓN**:

- “**VARIACIÓN**” del valor de la Función Objetivo por unidad adicional en el segundo miembro de la restricción

#### ■ OBJETIVO:

- Determinar el **intervalo de variación** de  $b_i$  dentro del cual el **COSTE DE OPORTUNIDAD** es **CONSTANTE**
- En este intervalo,
  - La base (variables con valor cero y variables con valor distinto de cero) permanece constante
  - Se puede predecir el nuevo valor óptimo de la función objetivo

## 3.4 Análisis de sensibilidad

---

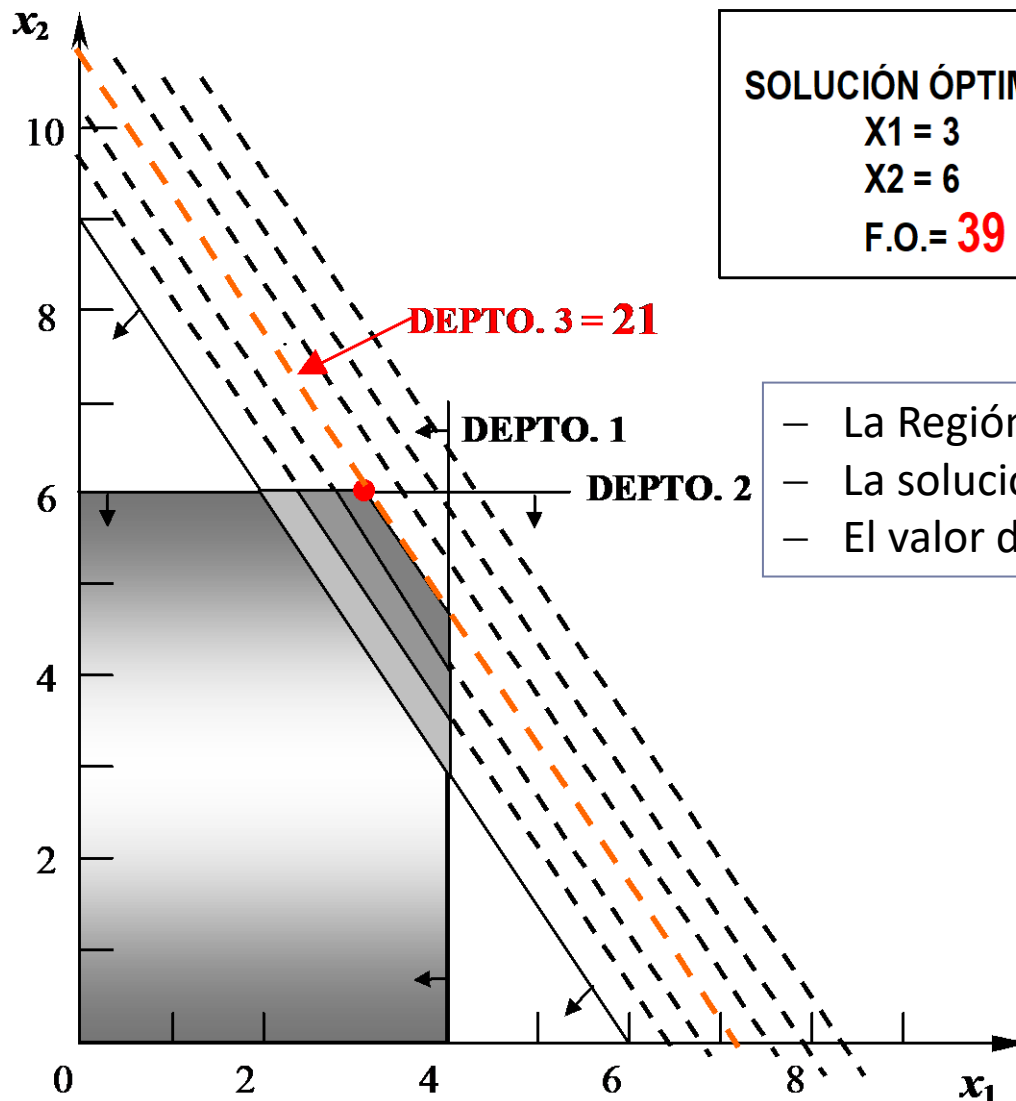
### ■ EJEMPLO de PRODUCCIÓN

- La gerencia se está planteando la adquisición de nueva maquinaria en el departamento 3 que supondría aumentar la capacidad de producción de dicho departamento a 21 horas semanales

**¿CUÁL SERÍA EL NUEVO BENEFICIO?**

**¿SEGUIRÍAMOS FABRICANDO UNIDADES DE LOS  
MISMOS TIPOS DE PLACA BASE?**

## 3.4 Análisis de sensibilidad



SOLUCIÓN ÓPTIMA:

$$x_1 = 3$$

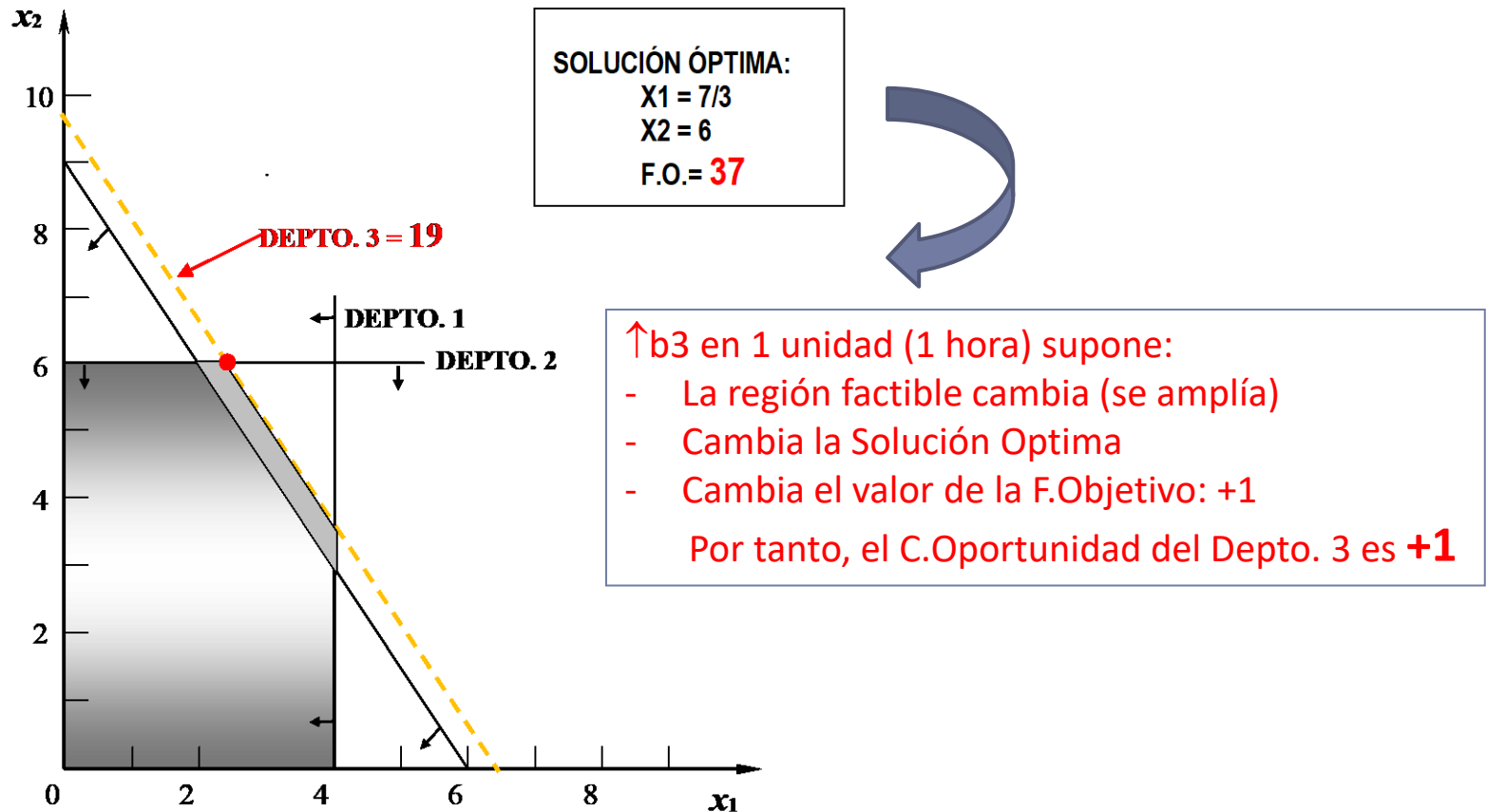
$$x_2 = 6$$

$$F.O. = 39$$

- La Región Factible cambia (se amplía)
- La solución óptima cambia
- El valor de la función objetivo cambia

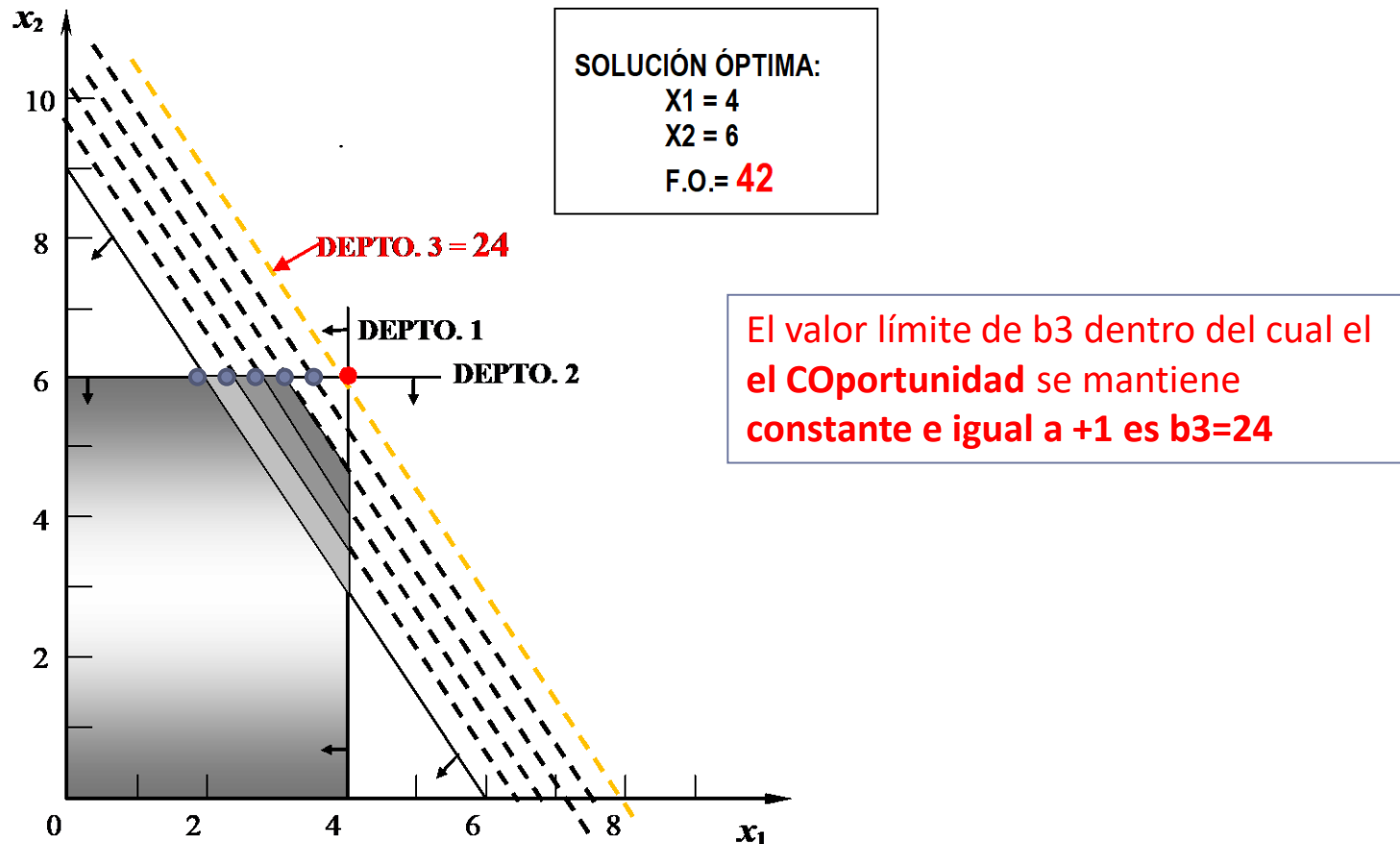
## 3.4 Análisis de sensibilidad

Y, ¿cuál es el efecto del incremento **unitario** del lado derecho de la restricción 3?



## 3.4 Análisis de sensibilidad

Y, ¿en qué rango de valores puede cambiar  $b_3$  y mantenerse el C.Oportunidad constante?



## 3.4 Análisis de sensibilidad

---

### CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE $b_3$ :

- Mientras  $b_3 \in [12, \dots, 24]$ 
  - El **coste de oportunidad** de la restricción del **departamento 3** se mantiene constante e igual a **+1**.
  - La **solución óptima cambia** al tratarse de una restricción limitativa en la solución óptima.
  - El valor de la **función objetivo cambia** pero se puede predecir su valor (en función del C.Oportunidad)
  - Se **mantiene** la misma **Solución Básica** (variables que son 0 y  $\neq 0$ )

## 3.4 Análisis de sensibilidad

---

**Además, hay que tener en cuenta que:**

- El coste de oportunidad de una restricción que no se verifica estrictamente en la Solución óptima es  $= 0$
- El coste de oportunidad de una restricción que se verifica estrictamente en la Solución Óptima es en general  $\neq 0$
- Los costes de oportunidad proporcionan a la gerencia una valiosa información acerca de los **beneficios que pueden obtenerse al suavizar las restricciones**. Si estos beneficios superan el coste que provoca suavizar una restricción dada, entonces dichos cambios son interesantes

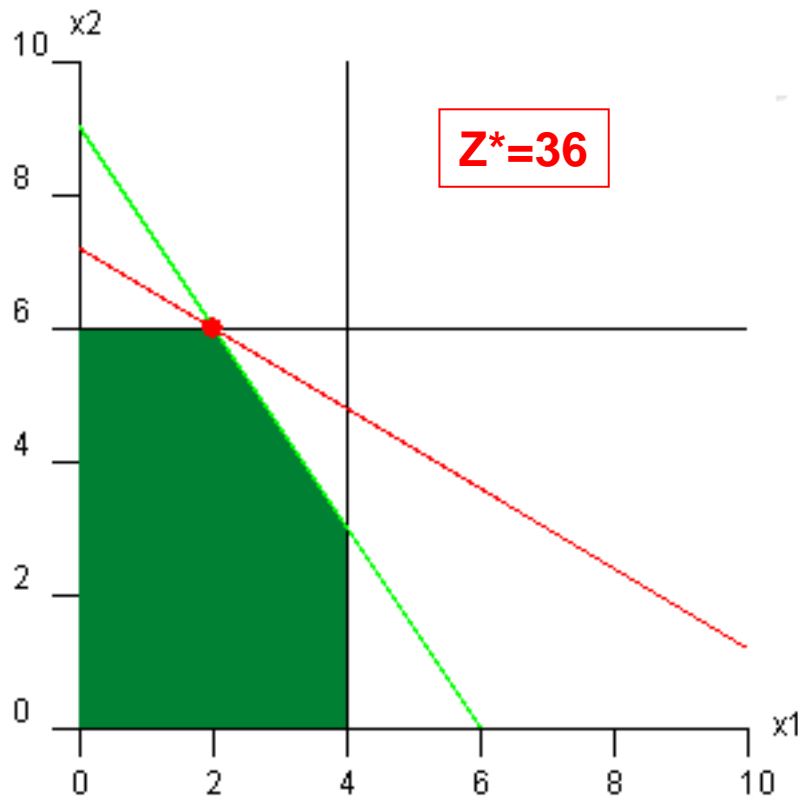
## 3.4 Análisis de sensibilidad

**COSTE DE OPORTUNIDAD** de una **RESTRICCIÓN**: “**VARIACIÓN**” del valor de la Función Objetivo por unidad adicional en el segundo miembro de la restricción

- **COSTE DE OPORTUNIDAD** de una **RESTRICCIÓN**  $\leq$  (limitativa en la S.Optima)
  - “**MEJORA**” del valor de la Función Objetivo por incremento en el segundo miembro de la restricción
    - **MEJORA**: si **MAX**  $\rightarrow$  **aumento** en el valor de la F.O.  
si **MIN**  $\rightarrow$  **disminución** en el valor de la F.O.
- **COSTE DE OPORTUNIDAD** de una **RESTRICCIÓN**  $\geq$  (limitativa en la S.Optima)
  - “**EMPEORAMIENTO**” del valor de la Función Objetivo por incremento en el segundo miembro de la restricción
    - **EMPEORAMIENTO**: si **MAX**  $\rightarrow$  **disminución** en el valor de la F.O.  
si **MIN**  $\rightarrow$  **aumento** en el valor de la F.O.



## 3.4 Análisis de sensibilidad



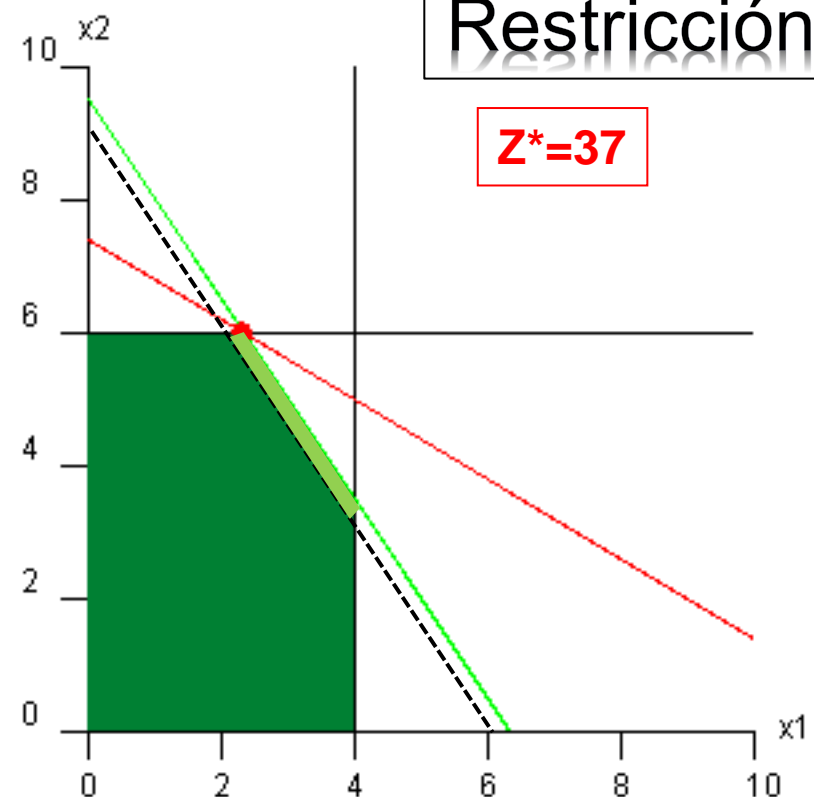
Función Objetivo  $Z =$    $X_1 +$    $X_2$  MAX

☐ ☒ Restriccion 1:   $X_1 +$    $X_2$   $\leq$

☐ ☒ Restriccion 2:   $X_1 +$    $X_2$   $\leq$

☐ ☒ Restriccion 3:   $X_1 +$    $X_2$   $\leq$  18

☐ ☐ Restriccion 4:   $X_1 +$    $X_2$   $\leq$



Función Objetivo  $Z =$    $X_1 +$    $X_2$  MAX

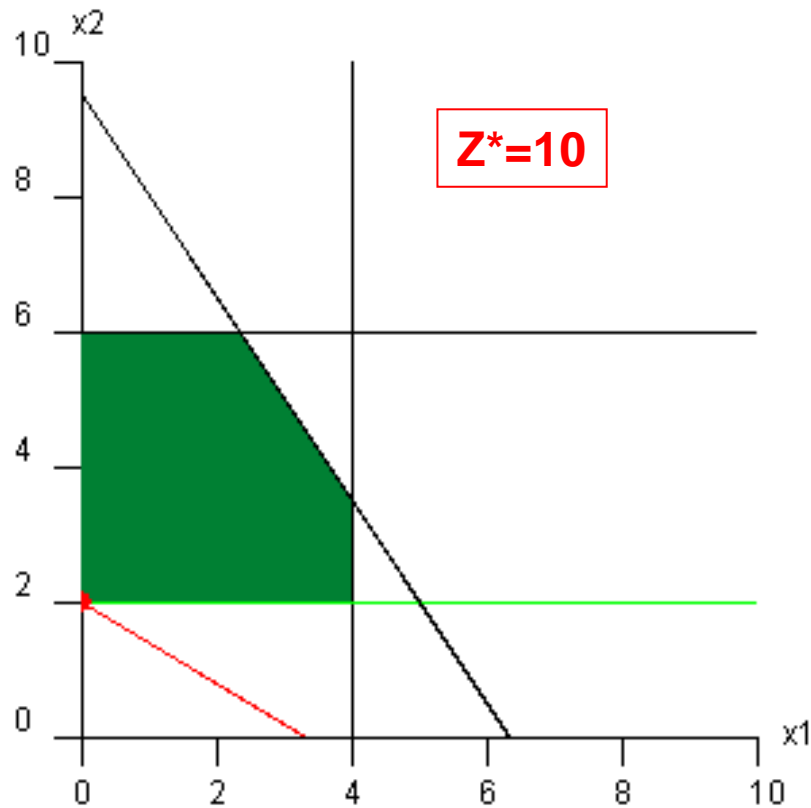
☐ ☒ Restriccion 1:   $X_1 +$    $X_2$   $\leq$

☐ ☒ Restriccion 2:   $X_1 +$    $X_2$   $\leq$

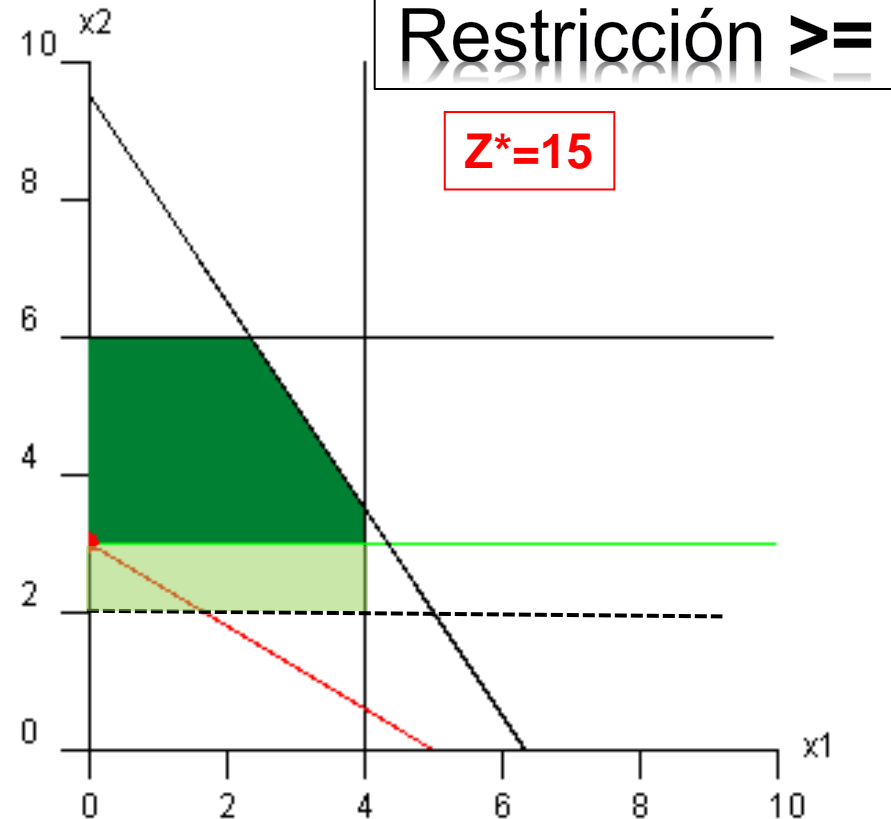
☐ ☒ Restriccion 3:   $X_1 +$    $X_2$   $\leq$  19.0

☐ ☐ Restriccion 4:   $X_1 +$    $X_2$   $\leq$

## 3.4 Análisis de sensibilidad



☐ ☒ Restriccion 1:   $x_1$  +   $x_2$   $\leq$   - +  
☒ Restriccion 2:   $x_1$  +   $x_2$   $\leq$   - +  
☒ Restriccion 3:   $x_1$  +   $x_2$   $\leq$   - +  
☐ ☒ Restriccion 4:   $x_1$  +   $x_2$   $\geq$   - +



☐ ☒ Restriccion 1:   $x_1$  +   $x_2$   $\leq$   - +  
☒ Restriccion 2:   $x_1$  +   $x_2$   $\leq$   - +  
☒ Restriccion 3:   $x_1$  +   $x_2$   $\leq$   - +  
☐ ☒ Restriccion 4:   $x_1$  +   $x_2$   $\geq$   - +

## 3.5 Resolución de modelos con el software de optimización LINGO©

---

**!EJEMPLO1: UN EJEMPLO DE PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCION;**

**[OBJ] MAX = 3 \* X1 + 5 \* X2;**

**[DEPTO1] X1 <= 4;**

**[DEPTO2] 2\*X2 <= 12;**

**[DEPTO3] 3\*X1 + 2\*X2 <= 18;**

# 3.5 Resolución de modelos con el software de optimización LINGO®

## SOLUCIÓN ÓPTIMA

Objective value: 36.00000 (VALOR FUNCION OBJETIVO)

.....VALOR VARIABLES.....

Variable	Value	Reduced Cost (COSTE REDUCIDO)
x1	2.000000	0.000000
x2	6.000000	0.000000

.....VALOR RESTRICCIONES.....

Row	Slack or Surplus (HOLGURA)	Dual Price (COSTE DE OPORTUNIDAD)
OBJ	36.00000	1.000000
DEPTO1	2.000000	0.000000
DEPTO2	0.000000	1.500000
DEPTO3	0.000000	1.000000

## 3.5 Resolución de modelos con el software de optimización LINGO®

---

### ANALISIS DE SENSIBILIDAD

Ranges in which the basis is unchanged:

#### Objective Coefficient Ranges (A.S. COEFICIENTES F.O.)

	Current	Allowable	Allowable
Variable	Coefficient	Increase	Decrease
X1	3.000000	4.500000	3.000000
X2	5.000000	INFINITY	3.000000

#### Righthand Side Ranges (A.S. 2º MIEMBRO RESTRICCIONES)

Row	Current	Allowable	Allowable
	RHS	Increase	Decrease
DEPTO1	4.000000	INFINITY	2.000000
DEPTO2	12.00000	6.000000	6.000000
DEPTO3	18.00000	6.000000	6.000000

## 3.5 Resolución de modelos con el software de optimización LINGO®

---

### COSTE REDUCIDO

- El coste reducido para una variable igual a cero en la solución óptima, indica el cambio en el valor de la función objetivo por unidad de incremento en el valor de dicha variable.
- El coste reducido indica cuánto debería mejorar el coeficiente en la función objetivo de una variable que es cero en la solución óptima actual, antes de que empezara a interesar que dicha variable fuese distinta de cero.

## 3.5 Resolución de modelos con el software de optimización LINGO®

---

### CUESTIONES:

1. ¿Qué impacto tendría sobre el **plan óptimo** de producción y sobre el valor óptimo de la **función objetivo** un **incremento** de 4 (miles de €) en el beneficio asociado a las placas base tipo 1?
2. Idem si el **incremento** fuera de 5 (miles de €).
3. ¿Qué impacto tendría sobre el **plan óptimo** de producción y sobre el valor óptimo de la **función objetivo** un **incremento** de 4 horas en la capacidad del **departamento 2**? Y si el **incremento** fuera de 8 horas?
4. ¿Qué impacto tendría sobre el **plan óptimo** de producción y el valor óptimo de la **función objetivo** un **incremento** de 10 horas en la capacidad del **departamento 1**?

## 3.5 Resolución de modelos con el software de optimización LINGO®

---

### CUESTIONES:

5. Se dispone de una partida presupuestaria para **aumentar la capacidad de un departamento**. ¿Cuál de los tres departamentos mejorarías? Justifica la respuesta.
6. Nos plantean la posibilidad de fabricar semanalmente un **tercer tipo de placa base** que requeriría 1 hora del departamento de Producción y 1 hora en el departamento de Calidad. Este nuevo tipo de placa base no necesita pasar por el departamento de Montaje. El beneficio de cada lote de la nueva placa base es de 2000€.

Teniendo en cuenta la información de la solución óptima actual, ¿sería rentable producir el nuevo producto?



## 3.5 Resolución de modelos con el software de optimización LINGO<sup>©</sup>

---

### CONCEPTOS FUNDAMENTALES

- ▶ **SOLUCIÓN POSIBLE:** Combinación de valores de las variables que satisfacen simultáneamente todas las restricciones
- ▶ **REGION FACTIBLE:** Conjunto de todas las soluciones posibles
- ▶ **HOLGURA (SLACK):** Diferencia entre el valor que toma la restricción y el coeficiente del segundo miembro.
- ▶ **COSTE REDUCIDO (REDUCED COST) asociado a una variable en una solución,** es la cantidad en la que debe **mejorar** su contribución a la función objetivo para que dicha variable tome un valor positivo en la solución.
- ▶ **COSTE DE OPORTUNIDAD (DUAL PRICE) asociado a una restricción,** es el ratio de “**variación**” en el valor óptimo de la función objetivo **por unidad adicional** en el segundo miembro de la restricción.

# Caso Práctico: Solución Óptima y Análisis de Sensibilidad

---

Una empresa produce **dos modelos** de ordenadores personales, uno **portátil** y otro para **escritorio**. En la única planta que posee **fabrica las cajas, monta los componentes en las tarjetas de circuito impreso y las ensambla**.

Durante el último trimestre del año produjo **2000 portátiles** y **600 para escritorio** cada **mes**. En la reunión trimestral de ejecutivos el gerente de ventas sugirió dejar de producir el modelo para escritorio porque no era rentable. El jefe de producción argumentó que se debía a la fabricación de pocas unidades y a unos costes fijos elevados. Sin embargo, si se fabricaran más unidades, por ejemplo acudiendo a subcontratación en la operación de montaje de tarjetas, ya no existiría este problema.

## Caso Práctico: Solución Óptima y Análisis de Sensibilidad

---

Para tomar una buena decisión el jefe de producción ha planteado y resuelto un modelo de planificación de la producción **mensual**. Los resultados obtenidos son los que se adjuntan.

Se ha considerado que el montaje de tarjetas de circuito impreso puede realizarse en la empresa o puede subcontratarse con otra. **Pi** representa el número de **portátiles** con tarjetas de circuito montadas en la empresa y **Pe** las unidades fabricadas con tarjetas montadas fuera (subcontratación). Análogamente, para **Oi** y **Oe**, que son las variables que representan el número de **ordenadores** del modelo para escritorio. Los coeficientes de la función objetivo son los márgenes brutos (precio de venta menos coste variable) y vienen expresados en **miles de u.m.** Se supone que la demanda de ordenadores se mantendrá alta.

## Caso Práctico: Solución Óptima y Análisis de Sensibilidad

---

!MAXIMIZAR EL MARGEN BRUTO  
EN PLANIFICACION DE LA PRODUCCION (miles de u.m.);

$$\text{MAX} = 60 * P_i + 59 * P_e + 58 * O_i + 57 * O_e;$$

$$[\text{CAJAS}] P_i + P_e + 2 * O_i + 2 * O_e \leq 4000;$$

$$[\text{TARJETAS}] 1.2 * P_i + O_i \leq 3000;$$

$$[\text{ENPORT}] P_i + P_e \leq 2000;$$

$$[\text{ENESCR}] O_i + O_e \leq 1800;$$

# Caso Práctico: Solución Óptima y Análisis de Sensibilidad

## Solución Óptima

Variable	Value	Reduced Cost
Pi	1666.667	0.0000000
Pe	333.333	0.0000000
Oi	1000.000	0.0000000
Oe	0.000000	0.1666679

Row	Slack or Surplus	Dual Price
OBJ	177666.7	1.00000
CAJAS	0.00000	28.58333
TARJETAS	0.00000	0.83333
ENPORT	0.00000	30.41667
ENESCR	800.000	0.00000

# Caso Práctico: Solución Óptima y Análisis de Sensibilidad

## Análisis de Sensibilidad

Ranges in which the basis is unchanged:

Objective Coefficient Ranges			
Variable	Current Coefficient	Allowable Increase	Allowable Decrease
Pi	60.00000	0.2000015	1.000000
Pe	59.00000	1.000000	0.2000015
Oi	58.00000	60.83333	0.1666679
Oe	57.00000	0.1666679	INFINITY

Righthand Side Ranges			
Row	Current RHS	Allowable Increase	Allowable Decrease
CAJAS	4000.000	1600.000	800.0002
TARJETAS	3000.000	400.0001	2000.000
ENPORT	2000.000	2000.000	571.4286
ENESCR	1800.000	INFINITY	800.0000

# Caso Práctico: Solución Óptima y Análisis de Sensibilidad

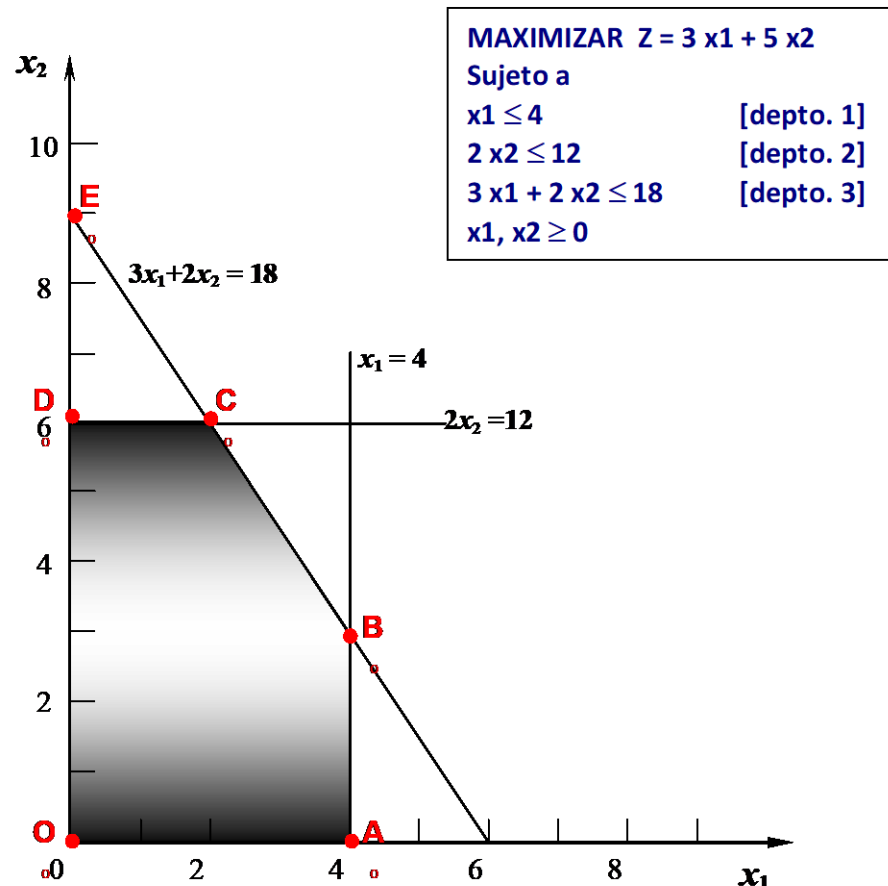
---

## PREGUNTAS:

1. Está funcionando la empresa de forma adecuada?  
En caso negativo ¿Qué debería fabricar? ¿Debe subcontratar?  
¿Cuánto podría mejorar el margen bruto obtenido por la empresa?
2. ¿Es aceptable esta solución o tendríamos que trabajar con variables de naturaleza entera? Justifica la respuesta.
3. ¿Qué conclusiones se obtienen del análisis de sensibilidad?
4. Si una tercera empresa ofreciera realizar el montaje de las tarjetas 500 u.m. más barato por unidad en el modelo de escritorio.  
¿Cambiaría el plan óptimo de producción? ¿Por qué?
5. ¿Interesaría aumentar la capacidad de ensamblado de portátiles en 1000 unidades mensuales si el coste implicado fuera de 10 millones de u.m.? Justifica la respuesta.

## 3.6 Conceptos básicos de programación lineal

- Trabajaremos con el problema de producción del apartado anterior. El modelo y representación gráfica es la siguiente:

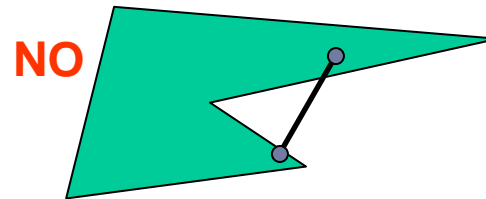
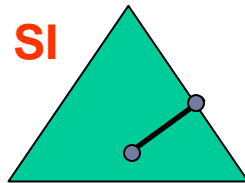




## 3.6 Conceptos básicos de programación lineal

---

- **CONJUNTO CONVEXO**: un conjunto es convexo si dados dos puntos A y B cualesquiera, contenidos en el mismo, el segmento de recta que los une queda contenido en dicho conjunto



- Esta es una característica de la **REGIÓN FACTIBLE** de todo programa lineal y es la base del procedimiento de resolución conocido como **ALGORITMO SIMPLEX**

## 3.6 Conceptos básicos de programación lineal

---

- ▶ **PUNTOS EXTREMOS:** Vértices del polígono que forma la región factible (en el caso de dos variables)
- ▶ La **solución óptima** de un problema de programación lineal, si existe, es un **punto extremo** (vértice) de la región factible (i.e. cumple todas las restricciones). Si el problema tiene soluciones óptimas múltiples, entonces al menos dos deben ser puntos extremos. En este caso, cualquier solución óptima se obtendrá como combinación lineal convexa de dichos puntos extremos.

## 3.6 Conceptos básicos de programación lineal

---

¿Cómo se generan estos puntos extremos **algebraicamente**?

**Paso 1:** Pasar el modelo a **forma estándar**  
(añadir variables de holgura):

### Modelo en Forma General

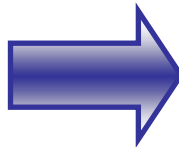
$$\text{Max } Z = 3x_1 + 5x_2$$

$$x_1 \leq 4$$

$$2x_2 \leq 12$$

$$3x_1 + 2x_2 \leq 18$$

$$x_1, x_2 \geq 0$$



### Modelo en Forma Estándar

$$\text{Max } Z = 3x_1 + 5x_2$$

$$x_1 + x_3 = 4$$

$$2x_2 + x_4 = 12$$

$$3x_1 + 2x_2 + x_5 = 18$$

$$x_j \geq 0, \text{ para } j=1,2,3,4,5$$

## 3.6 Conceptos básicos de programación lineal

---

**Paso 2:** Resolver el sistema de ecuaciones resultante:

$$x_1 + x_3 = 4 \text{ (depto.1)}$$

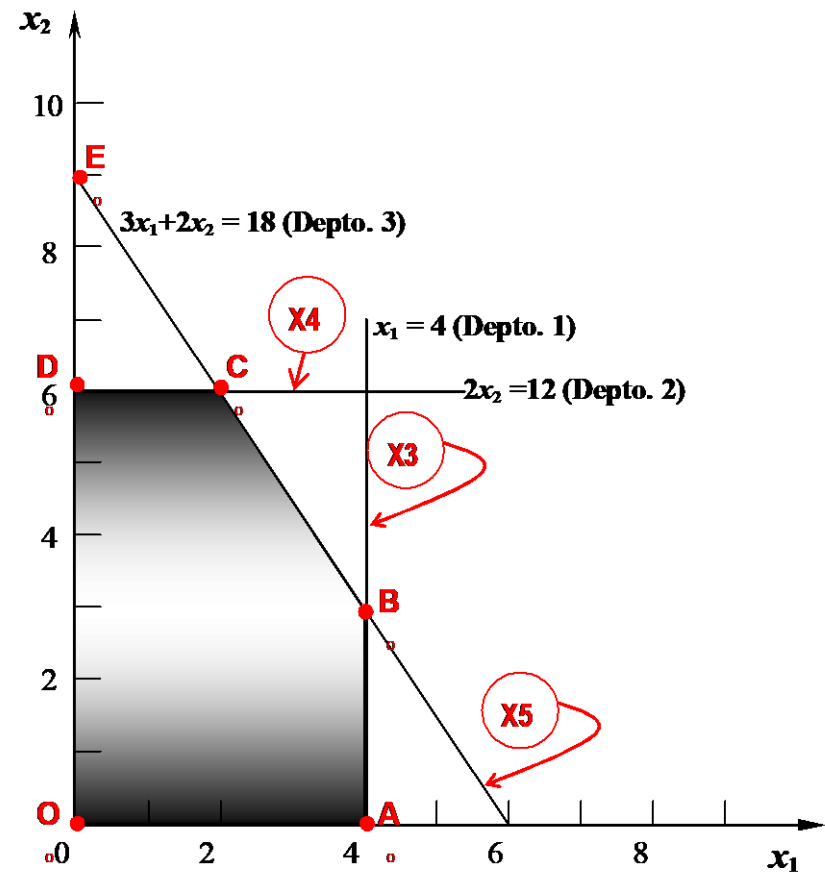
$$2x_2 + x_4 = 12 \text{ (depto.2)}$$

$$3x_1 + 2x_2 + x_5 = 18 \text{ (depto.3)}$$

- En el sistema de ecuaciones resultante al pasar el modelo a forma estándar:  $n > m$ , por tanto se pueden elegir  $n-m$  variables cualesquiera e igualarlas a cualquier valor arbitrario para **resolver el sistema de  $m$  ecuaciones en términos de las  $m$  variables restantes**. El método simplex usa **0** para ese valor arbitrario

## 3.6 Conceptos básicos de programación lineal

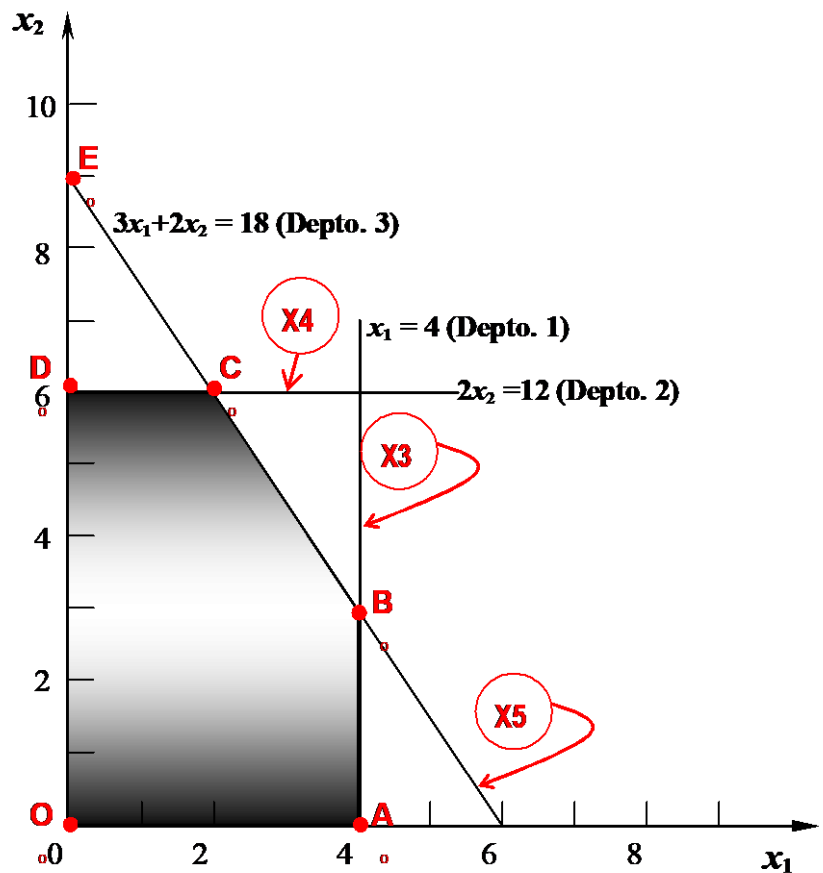
- Por ejemplo, el punto **C** que corresponde a la **solución óptima** se obtiene igualando  $X_4$  y  $X_5$  a cero.



## 3.6 Conceptos básicos de programación lineal

- La elección de las variables que se igualan a cero para obtener los puntos extremos no es arbitraria:

□ En el sistema de ecuaciones al igualar a cero  $X_1$  y  $X_5$  obtenemos el punto **E**:  $X_2=9$  y  $X_4=-6$   
**SOLUCIÓN NO FACTIBLE**



## 3.6 Conceptos básicos de programación lineal

---

### ■ SOLUCIÓN BÁSICA

Toda **solución** obtenida resolviendo el sistema de ecuaciones en el que se ha igualado a cero  **$n-m$  variables**

- Dado un programa lineal en la forma estándar con  **$n$**  variables (**de decisión y de holgura**) y  **$m$**  restricciones podemos afirmar que el subconjunto de variables que forma una **solución básica** se encuentra **igualando a cero  $(n-m)$  variables** y resolviendo el sistema de  **$m$**  ecuaciones resultantes con  **$m$**  variables

**Este sistema de ecuaciones tiene solución única**

## 3.6 Conceptos básicos de programación lineal

---

- En una solución básica, las  $(n-m)$  variables que se igualan a cero son las **variables no básicas** y las  $m$  restantes son las **variables básicas**
- **SOLUCIÓN BÁSICA FACTIBLE**: Es una solución básica en la cual toda  $x_j \geq 0$
- **SOLUCIONES BÁSICAS ADYACENTES**: En un programa lineal con  $m$  restricciones, dos soluciones básicas son adyacentes si sus conjuntos de variables básicas tienen  $m-1$  en común



## 3.6 Conceptos básicos de programación lineal

$$\uparrow 0 \rightarrow (0, 0, \neq 0, \neq 0, \neq 0)$$

$$\downarrow A \rightarrow (\neq 0, 0, 0, \neq 0, \neq 0)$$

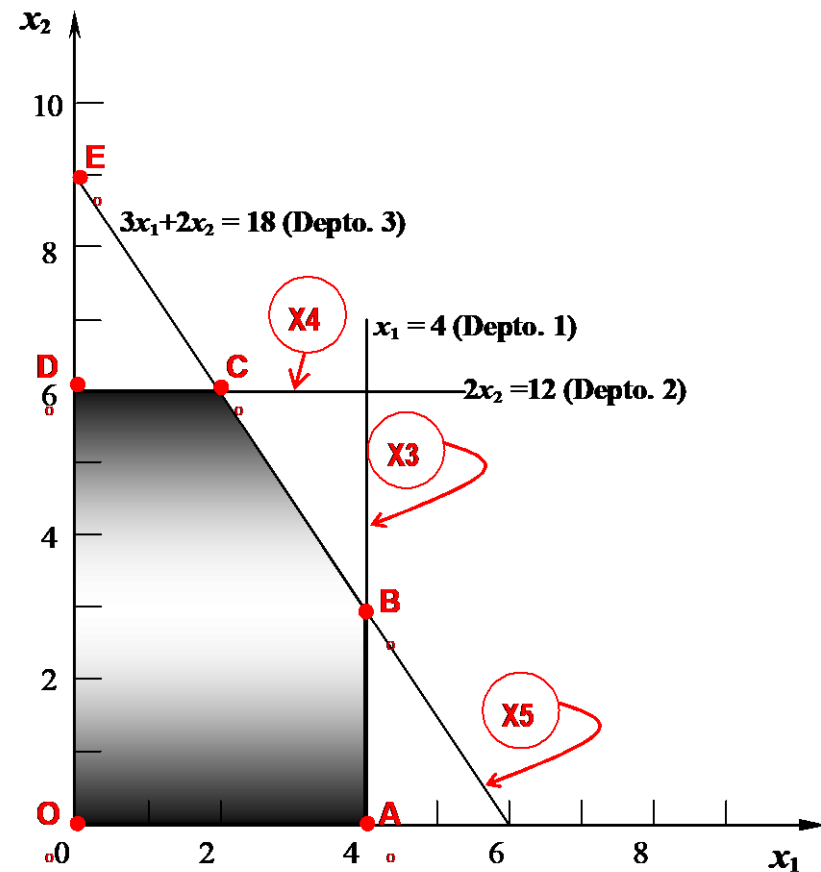
$$\uparrow A \rightarrow (\neq 0, 0, 0, \neq 0, \neq 0)$$

$$\downarrow B \rightarrow (\neq 0, \neq 0, 0, \neq 0, 0)$$

IDEM:  $B \leftrightarrow C$

$C \leftrightarrow D$

$D \leftrightarrow O$



## 3.6 Conceptos básicos de programación lineal

---

- **SOLUCIÓN DEGENERADA:** Es una solución básica factible que tiene **menos de  $m$**  variables **estrictamente positivas**
- **SOLUCIÓN NO DEGENERADA:** Es una solución básica factible con exactamente  **$m$**  variables estrictamente positivas
- **SOLUCIÓN ÓPTIMA:** Es una solución básica factible que optimiza la función objetivo del problema

## 3.7 Algoritmo Simplex: conceptos básicos

---

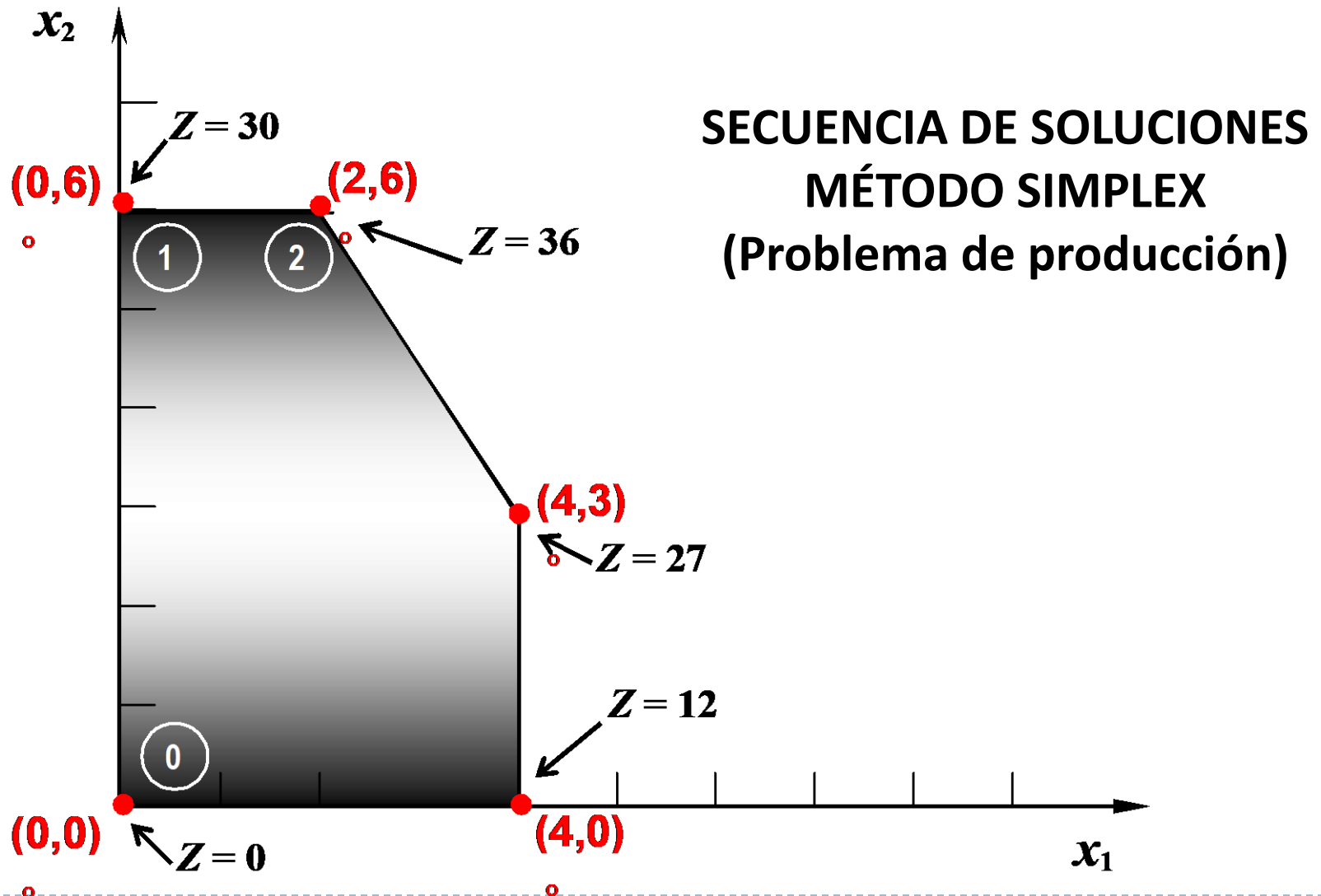
- El **método Simplex** es el algoritmo de resolución de problemas de programación lineal más importante. Fue desarrollado en **1947** por **George Dantzig** y **ha sido considerado uno de los algoritmos más importantes del siglo XX** (Nash, 2002)
- El algoritmo Simplex se basa en la **resolución de sistemas de ecuaciones** lineales con el procedimiento de Gauss-Jordan apoyado con criterios para el cambio de la solución básica. Es un **procedimiento iterativo** que se aplica hasta que se cumple la condición de optimalidad

## 3.7 Algoritmo Simplex: conceptos básicos

---

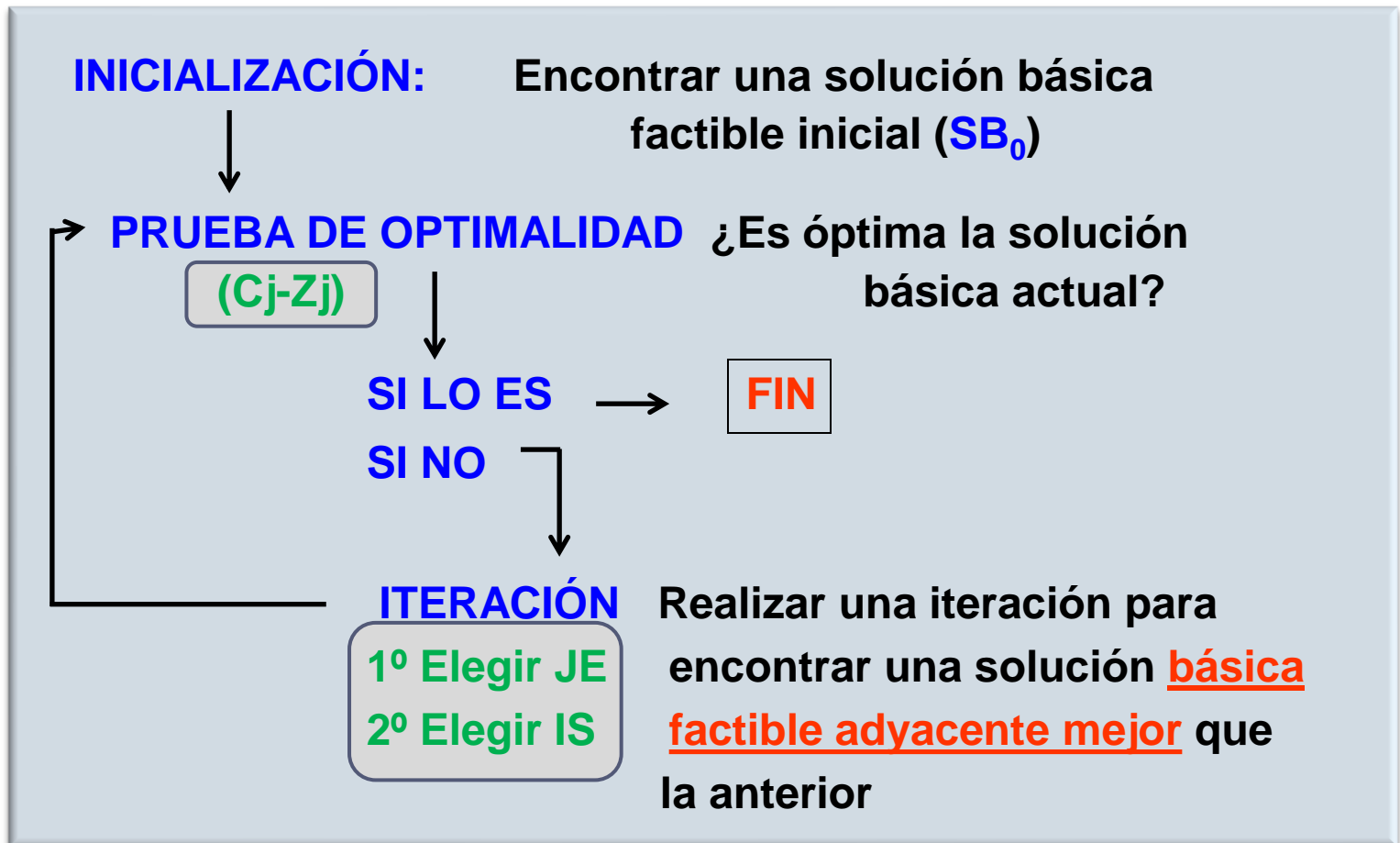
- La **idea general** del método Simplex consiste en partir de una **solución básica factible** e ir a una **solución básica factible adyacente** con **mejor valor de la función objetivo**
- Este proceso continúa hasta que ya no se puedan obtener mejoras y se habrá encontrado la solución óptima

## 3.7 Algoritmo Simplex: conceptos básicos



## 3.7 Algoritmo Simplex: conceptos básicos

- La aplicación del método Simplex se desarrolla a través de las siguientes etapas:



## 3.8 Algoritmo Simplex en forma de tablas

---

- Trabajaremos con el ejemplo de producción de componentes informáticos:

$$\text{MAXIMIZAR } Z = 3x_1 + 5x_2$$

Sujeto a

$$x_1 \leq 4$$

$$2x_2 \leq 12$$

$$3x_1 + 2x_2 \leq 18$$

$$x_1, x_2 \geq 0$$

## 3.8 Algoritmo Simplex en forma de tablas

---

- La aplicación del método simplex en forma de tablas implica:
  1. Expresar el modelo en forma estándar
  2. Construir la **tabla simplex** y mostrar las soluciones básicas obtenidas en forma tabular



## 3.8 Algoritmo Simplex en forma de tablas

---

1. Pasar el modelo a **forma estándar** introduciendo las correspondientes variables de holgura:

$$\text{Max } Z = 3x_1 + 5x_2$$

$$x_1 + x_3 = 4$$

$$2x_2 + x_4 = 12$$

$$3x_1 + 2x_2 + x_5 = 18$$

$$x_j \geq 0, \text{ para } j=1,2,3,4,5$$

## 3.8 Algoritmo Simplex en forma de tablas

2. Construir la **tabla simplex** y mostrar las soluciones básicas obtenidas en forma tabular:

$$E1: x_1 + 0x_2 + x_3 + 0x_4 + 0x_5 = 4$$

$$E2: 0x_1 + 2x_2 + 0x_3 + x_4 + 0x_5 = 12$$

$$E3: 3x_1 + 2x_2 + 0x_3 + 0x_4 + x_5 = 18$$

$$E4: -Z + 3x_1 + 5x_2 = 0$$

### Condiciones de la Tabla Simplex:

- Cada VBásica (**VB**) aparece con coeficiente no cero en una y sólo una de las ecuaciones.
- En la ecuación en la que la VB aparece con coeficiente no cero, su coeficiente es 1
- Cada ecuación contiene sólo 1 VB con coeficiente 1 (para el resto será 0)
- El valor de la función objetivo, Z, aparece sólo en la última ecuación y con coeficiente -1

## 3.8 Algoritmo Simplex en forma de tablas

**Solución básica factible inicial ( $SB_0$ ):** todas las variables decisión igual a 0

**Tabla  $SB_0$**

V.BÁSICAS	x1	x2	x3	x4	x5	bi
<b>x3</b>	1	0	1	0	0	4
<b>x4</b>	0	2	0	1	0	12
<b>x5</b>	3	2	0	0	1	18
<b>Cj-Zj</b>	3	5	0	0	0	0

**VAR. BÁSICAS** (x3, x4, x5)

**MATRIZ IDENTIDAD (VAR. BÁSICAS)** (x3, x4, x5)

**VECTOR RECURSOS** (4, 12, 18)

**-Z** (0)

## 3.8 Algoritmo Simplex en forma de tablas

---

- ▶ La **ventaja** de esta tabla es que permite disponer de la **solución de forma inmediata**. En particular, sabiendo que las Variables No Básicas (VNB) son igual a 0, el valor de las VB es el del segundo miembro de las ecuaciones.
- ▶ En nuestro ejemplo, cuando  $x_1=x_2=0$ , se determina fácilmente por observación que la solución es  $x_3=4$ ,  $x_4=12$ ,  $x_5=18$  y  $-z=0$ .
- ▶ En las sucesivas iteraciones del Simplex, **se deben mantener estas mismas características**, i.e., **las VB siempre deben tener asociada la matriz identidad** de modo que se disponga del valor de las mismas de forma inmediata.

## 3.8 Algoritmo Simplex en forma de tablas

**Interpretación de los coeficientes en la Tabla Simplex:** describen el efecto sobre cada VB al incrementar una VNB

$\alpha_{ij}^+$ : decremento  
 $\alpha_{ij}^-$ : incremento

$\alpha_{4,2}$ : Decremento de  $x_4$  por unidad de  $x_2$  que entre en la solución

MATRIZ IDENTIDAD (VAR. BÁSICAS)

VECTOR RECURSOS

Tabla  $SB_0$

V.BÁSICAS	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$b_i$
$x_3$	1	0	1	0	0	4
$x_4$	0	2	0	1	0	12
$x_5$	3	2	0	0	1	18
$C_j - Z_j$	3	5	0	0	0	0

VAR. BÁSICAS

COEFICIENTES REDUCIDOS  $C_j - Z_j = C_j - \sum \alpha_{ij} C_i$

- Z

## 3.8 Algoritmo Simplex en forma de tablas

- El **coeficiente reducido** de la función objetivo ( $C_j - Z_j$ ) asociado a la variable  $x_j$  siempre representa la variación de la función objetivo por unidad de dicha variable (**no básica**) que entre en la base. Si es positivo aumentará el valor de la función objetivo, si es negativo disminuirá dicho valor
- El coeficiente reducido de las **variables básicas** siempre es cero
- Los  $C_j - Z_j$  en la **solución óptima** tienen una interpretación especial:
  - Asociados a variable de holgura: **coste de oportunidad** de la restricción asociada
  - Asociado a variable decisión: **coste reducido**

## 3.8 Algoritmo Simplex en forma de tablas

... Para cada SBFactible, la pregunta es: Esta solución, ¿es óptima?

**PRUEBA DE OPTIMALIDAD:** Criterio de la Función Objetivo = **MAX**

$$\text{VNB} = x_1, x_2$$

Tabla  $SB_0$

V.BÁSICAS	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	bi
$x_3$	1	0	1	0	0	4
$x_4$	0	2	0	1	0	12
$x_5$	3	2	0	0	1	18
Cj-Zj	3	5	0	0	0	0

**NO es solución óptima** → ITERACIÓN (SB adyacente)

$$\text{JE} = x_2$$

## 3.8 Algoritmo Simplex en forma de tablas

---

**PRUEBA DE OPTIMALIDAD:** ¿Esta solución es óptima?

$$Z = 3 x_1 + 5 x_2$$

- El  $C_j - Z_j$  de las variables no básicas ( $x_1$ ,  $x_2$ ) da la tasa de variación de  $Z$  si aumentara el valor de esa variable. Esas tasas de variación son positivas.

De hecho,

- ☐ si  $x_1 = 1$  la función objetivo aumenta en 3
  - ☐ si  $x_2 = 1$  la función objetivo aumenta en 5
- 
- Por tanto, pueden existir puntos extremos con mejor valor de  $Z \rightarrow$  el **punto O NO es solución óptima**



## 3.8 Algoritmo Simplex en forma de tablas

### ITERACIÓN

**PASO 1:** Determinar la dirección de movimiento (**Variable que ENTRA EN LA BASE: JE**)

- Variables candidatas:  $(x_1, x_2)$
- Tasa de cambio de Z:

$$Z = 3x_1 + 5x_2$$

- ¿aumento de  $x_1$ ? Tasa de mejora en  $Z=3$
- ¿aumento de  $x_2$ ? Tasa de mejora en  $Z=5$
- $5>3$ , por tanto se elige  $x_2$  para aumentar Z

$$JE = x_2$$

## 3.8 Algoritmo Simplex en forma de tablas

### PASO 2: ...¿Cuánto puede incrementarse una VNB?

¿ IS ?

Tabla  $SB_0$

V.BÁSICAS	x1	x2	x3	x4	x5	bi
x3	1	0	1	0	0	4
x4	0	2	0	1	0	12
x5	3	2	0	0	1	18
Cj-Zj	3	5	0	0	0	0

Al **modificar** (aumentar)  $x_2$  ( $x_1=0$ ) cambia en general el valor de las variables básicas:

$$\begin{array}{llllll} (1) & x_1 & + x_3 & = 4 & \mathbf{x_3=4} & \\ (2) & 2x_2 & + \mathbf{x_4} & = 12 & \mathbf{x_4=12-2x_2} & \leftarrow \text{IS} \\ (3) & 3x_1 + 2x_2 & + \mathbf{x_5} & = 18 & \mathbf{x_5=18-2x_2} & \end{array}$$

## 3.8 Algoritmo Simplex en forma de tablas

- Para determinar la variable que sale de la base (**IS**) calculamos en una columna adicional el cociente:

$b_i/\alpha_{ij}^+$  : número de unidades de  $x_j$  que deben entrar en la base para que  $x_i$  sea cero

V.BÁSICAS	x1	x2	x3	x4	x5	bi	$b_i/\alpha_{ij}^+$
x3	1	0	1	0	0	4	-
x4	0	2	0	1	0	12	12/2 ← <b>IS</b>
x5	3	2	0	0	1	18	18/2
Cj-Zj	3	5	0	0	0	0	

↑  
**JE**

$$\theta_{xj} = \min \frac{b_i}{\alpha_{ij}}, \quad \forall \alpha_{ij} > 0$$

¿POR QUÉ NO SE HA CALCULADO EL COCIENTE  $b_i/\alpha_{ij}^+$  CORRESPONDIENTE A x3?

## 3.8 Algoritmo Simplex en forma de tablas

- Para determinar la variable que sale de la base (**IS**) calculamos en una columna adicional el cociente:

$bi/\alpha_{ij}^+$  : número de unidades de  $x_j$  que deben entrar en la base para que  $x_i$  sea cero

V.BÁSICAS	x1	x2	x3	x4	x5	bi	$bi/\alpha_{ij}^+$
x3	1	0	1	0	0	4	-
x4	0	2	0	1	0	12	12/2 ← <b>IS</b>
x5	3	2	0	0	1	18	18/2
Cj-Zj	3	5	0	0	0	0	

## 3.8 Algoritmo Simplex en forma de tablas

- La nueva Solución Básica (SB) debe estar en forma canónica
- Aplicando:

$$\alpha^1_{IS,j} = \alpha^0_{IS,j} / \alpha^0_{IS,JE} = \alpha^0_{IS,j} / \text{PIVOTE}$$

$$\alpha^1_{i,j} = \alpha^0_{i,j} - \text{SEMIPIVOTE} * \alpha^1_{IS,j}$$

se obtiene la nueva *solución básica* que se muestra en la siguiente tabla simplex:

**Tabla SB<sub>1</sub>**

V.BÁSICAS	x1	x2	x3	x4	x5	bi
x3	1	0	1	0	0	4
x2	0	1	0	1/2	0	6
x5	3	0	0	-1	1	6
Cj-Zj	3	0	0	-5/2	0	-30

## 3.8 Algoritmo Simplex en forma de tablas

### ■ ITERACIÓN 2:

VNB = x1, x4

Tabla SB<sub>1</sub>

V.BÁSICAS	x1	x2	x3	x4	x5	bi	bi/ $\alpha_{ij}+$
x3	1	0	1	0	0	4	4/1
x2	0	1	0	1/2	0	6	-
x5	3	0	0	-1	1	6	6/3
Cj-Zj	3	0	0	-5/2	0	-30	

JE: x1 y IS: x5

## 3.8 Algoritmo Simplex en forma de tablas

### ■ ITERACIÓN 3:

Tabla  $SB_2$

V.BÁSICAS	x1	x2	x3	x4	x5	bi
x3	0	0	1	1/3	-1/3	2
x2	0	1	0	1/2	0	6
x1	1	0	0	-1/3	1/3	2
Cj-Zj	0	0	0	-3/2	-1	-36

( $\forall$  Cj-Zj asociado a VNB  $\leq 0$  [MAX])

**SOLUCIÓN ÓPTIMA**

**SOLUCIÓN:** producir 2 lotes de placas base tipo 1 y 6 lotes de placas base tipo 2 con un beneficio de 36 miles de euros

## 3.8 Algoritmo Simplex en forma de tablas

V.BÁSICAS	x1	x2	x3	x4	x5	bi
x3	0	0	1	1/3	-1/3	2
x2	0	1	0	1/2	0	6
x1	1	0	0	-1/3	1/3	2
Cj-Zj	0	0	0	-3/2	-1	-36

Objective value:

36.00000

Variable

Value

Reduced Cost

x1

2.000000

0.000000

x2

6.000000

0.000000

Row

Slack or Surplus

Dual Price

OBJ

36.00000

1.000000

DEPTO1

2.000000

0.000000

DEPTO2

0.000000

1.500000

DEPTO3

0.000000

1.000000

Valor  
Variables  
Decisión

Valor  
Variables  
Holgura

Cj-Zj



## 3.8 Algoritmo Simplex en forma de tablas

---

### ■ CRITERIO PARA ELEGIR LA VARIABLE QUE ENTRA EN LA BASE (JE)

- La variable que entra en la base es aquella VNB tal que:

Maximización:  $\text{Max}(C_j - Z_j), \forall (C_j - Z_j) > 0$

Minimización:  $\text{Min}(C_j - Z_j), \forall (C_j - Z_j) < 0$

- Cuando en una iteración no existe ningún coeficiente reducido positivo (caso Max.) no podremos mejorar más el valor de la función objetivo

## 3.8 Algoritmo Simplex en forma de tablas

---

### ■ **CRITERIO DE LA VARIABLE QUE SALE DE LA BASE** *(Independiente del criterio de la F.O.)*

- Dados los  $\alpha_{ij}$  de la variable no básica ( $x_j$ ) que entra en la base, la variable básica que sale ( $x_i$ ) es aquella que satisface:

$$\theta_{xj} = \min \frac{\text{valor de la variable básica } x_i}{\alpha_{ij}}, \quad \forall \alpha_{ij} > 0$$

y  $\theta_{xj}$  es el valor de  $x_j$  en la nueva solución

## 3.8 Algoritmo Simplex en forma de tablas

---

### ■ **CRITERIO DE OPTIMALIDAD (maximización)**

**Una solución básica factible es óptima si:**  
 **$(C_j - Z_j) \leq 0 \quad \forall \text{ Variable No Básica}$**

En minimización,  $(C_j - Z_j) \geq 0 \quad \forall \text{ VNB}$

## 3.8 Algoritmo Simplex en forma de tablas

### Ejercicio Propuesto :

- Calcular la solución óptima del siguiente programa lineal aplicando el **método simplex con tablas**.

$$\text{MAXIMIZAR } Z = 600x_1 + 900x_2$$

s.a:

$$x_1 + 2x_2 \leq 200$$

$$1/2x_1 + x_2 \leq 175$$

$$x_1, x_2 \geq 0$$

en la tabla de la solución óptima identificar los costes de oportunidad y los costes reducidos y comentar su significado

## 3.8 Algoritmo Simplex en forma de tablas

### EJERCICIO PROPUESTO:

- Calcular la solución óptima del siguiente programa lineal aplicando el **método simplex con tablas**.

$$\text{MAXIMIZAR } Z = 600x_1 + 1200x_2$$

$$\text{s.a: } x_1 + 2x_2 \leq 200$$

$$1/2x_1 + x_2 \leq 175$$

$$x_1, x_2 \geq 0$$

en la tabla de la solución óptima identificar los costes de oportunidad y los costes reducidos y comentar su significado. La solución óptima, ¿presenta alguna característica particular? ¿Cuál? Justificar la respuesta.

## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

---

- Al calcular la solución óptima mediante el algoritmo Simplex con tablas:
  - ¿es necesario realizar todos los **cálculos** en cada iteración del algoritmo?
  - ¿es necesario tener almacenada en **memoria** toda la información de la tabla Simplex actual?

**NO**

## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

- Veamos qué información ha sido utilizada en cada iteración del problema ejemplo (sombreademos la información necesaria):

$SB_0$

V.BÁSICAS	x1	x2	x3	x4	x5	bi	$bi/\alpha_{ij}^+$
x3	1	0	1	0	0	4	-
x4	0	2	0	1	0	12	12/2 ← IS
x5	3	2	0	0	1	18	18/2
Cj-Zj	3	5	0	0	0	0	

↑  
JE

## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

$SB_1$

V.BÁSICAS	x1	x2	x3	x4	x5	bi	bi/ $\alpha_{ij}+$
x3	1	0	1	0	0	4	4/1
x2	0	1	0	1/2	0	6	-
x5	3	0	0	-1	1	6	6/3
Cj-Zj	3	0	0	-5/2	0	-30	

$SB_2$

V.BÁSICAS	x1	x2	x3	x4	x5	bi
x3	0	0	1	1/3	-1/3	2
x2	0	1	0	1/2	0	6
x1	1	0	0	-1/3	1/3	2
Cj-Zj	0	0	0	-3/2	-1	-36



## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

---

- ▶ **Necesitamos:**
  - ▶ **Valor de las VBasicas** en la SB actual
  - ▶ **Valor de la F.O.** en la SB actual
  - ▶ **Cj-Zj de las VNB** para determinar si la SB actual es S.Óptima
  - ▶ **Columna JE** para determinar la variable que sale de la base (IS)

**¿Cómo calcular los datos necesarios en cada iteración?**

## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

---

- Sea un modelo de PL expresado en forma matricial:

$$\text{Max } Z = c^t x$$

$$\text{s.a: } A x = b$$

$$x \geq 0$$

- **Nomenclatura del Simplex Revisado:**

$x_B$  = Vector de **variables básicas**

$c_B^t$  = Coeficientes en la función objetivo asociados a **variables básicas**

$x_{NB}$  = Vector de variables no básicas

$c_{NB}^t$  = Coeficientes en la función objetivo asociados a **variables no básicas**

$B$  = Matriz cuyas columnas son los vectores de coeficientes técnicos **asociados a variables básicas**

$NB$  = Matriz cuyas columnas son los vectores de coeficientes técnicos asociados a **variables no básicas**

## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

---

- Entonces, dado el modelo expresado en forma matricial:

$$\text{Max } Z = c_B^t x_B + c_{NB}^t x_{NB}$$

s.a:

$$B x_B + NB x_{NB} = b$$

$$x_B, x_{NB} \geq 0$$

**¿Cómo calcular la información necesaria en cualquier solución básica?**

## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

---

- Aplicamos la anterior formulación al modelo ejemplo:

$$\text{Max } Z = 3x_1 + 5x_2$$

s.a:

$$x_1 + x_3 = 4$$

$$2x_2 + x_4 = 12$$

$$3x_1 + 2x_2 + x_5 = 18$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 \geq 0$$



## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

### ■ En forma matricial:

$$\text{Max } Z = \mathbf{c}^t \cdot \mathbf{x} = (3, 5, 0, 0, 0) \cdot \begin{pmatrix} x1 \\ x2 \\ x3 \\ x4 \\ x5 \end{pmatrix}$$

s.a:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 & 0 \\ 3 & 2 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x1 \\ x2 \\ x3 \\ x4 \\ x5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 \\ 12 \\ 18 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{a}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix}; \mathbf{a}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix}; \mathbf{a}_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \mathbf{a}_4 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}; \mathbf{a}_5 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

¿Cómo calcular el valor de una solución:  $X_B$  ?

- En cualquier solución,  $B x_B + NB x_{NB} = b$

si multiplicamos ambos lados de las restricciones por  $B^{-1}$ :

$$B^{-1} B x_B + B^{-1} NB x_{NB} = B^{-1} b$$

como  $(B^{-1} B) = I$ , entonces

$$x_B + B^{-1} NB x_{NB} = B^{-1} b$$

como  $x_{NB}=0$ , entonces  $(B^{-1} NB x_{NB})= 0$

- Por tanto, el valor de las variables básicas de cualquier solución, se puede calcular según:

$$x_B = B^{-1} b$$

## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

¿Cómo calcular los  $\alpha_{ij}$  asociados a la variable que entra en la base ( $y_{JE}$ )?

- Consideremos la solución obtenida en la segunda tabla del Simplex del problema ejemplo (**SB<sub>1</sub>**):

V.BÁSICAS	x1	x2	x3	x4	x5	bi	bi/ $\alpha_{ij}$ +
x3	1	0	1	0	0	4	4/1
x2	0	1	0	1/2	0	6	-
x5	3	0	0	-1	1	6	6/3
Cj-Zj	3	0	0	-5/2	0	-30	

¿?

**VB = (x3,x2,x5)**

## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

- Según la nomenclatura del Simplex Revisado: (**SB<sub>1</sub>**)

$$x_B = \begin{pmatrix} x_3 \\ x_2 \\ x_5 \end{pmatrix} ; \quad B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \end{pmatrix} ; \quad x_{NB} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_4 \end{pmatrix} ; \quad NB = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 3 & 0 \end{pmatrix}$$

- Calculamos  $B^{-1}$  (con dimensión **m x m**), y obtenemos:

$$B^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$





## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

- Siguiendo la nomenclatura del Simplex Revisado, **SB<sub>1</sub>** se puede expresar:

$$X_B + B^{-1} NB x_{NB} = B^{-1} b$$

$$\begin{pmatrix} x3 \\ x2 \\ x5 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 3 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x1 \\ x4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 4 \\ 12 \\ 18 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x3 \\ x2 \\ x5 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1/2 \\ 3 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x1 \\ x4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 4 \\ 12 \\ 18 \end{pmatrix}$$

$$y_{x1} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix} ; y_{x4} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1/2 \\ -1 \end{pmatrix}$$

## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

- Entonces, ¿Cómo calcular  $y_{x1}$ ?:

$$y_{x1} = B^{-1} a_{x1} \rightarrow \text{en general } \boxed{y_j = B^{-1} a_j}$$

- ¿Cómo calcular  $c_j - z_j$ ?:

$c_j$  es conocido siempre

$$z_j = \sum_{i=1}^m c_i \alpha_{ij}$$

$$z_j = c_B^t y_j = (c_B^t B^{-1}) a_j$$

Común para todo  $z_j$

- ¿Cómo calcular  $Z$ ?:

$$\boxed{Z = c_B^t x_B}$$

## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

---

### ■ Resumen Simplex Revisado:

Con  $B^{-1}$ ,  $b$ ,  $a_j$  y  $c$  (datos originales del problema) y sabiendo cuales son las variables básicas de la solución a estudiar (punto extremo):

- El valor de las variables básicas:

$$X_B = B^{-1} b$$

- Prueba de optimalidad ( $c_j - z_j$ ):

$$z_j = c_B^t y_j = (c_B^t B^{-1}) a_j$$

- El vector  $y_{JE}$  asociado a la variable que entra en la base:

$$Y_{JE} = B^{-1} a_j$$

- Valor de la Función Objetivo:

$$Z = c_B^t x_B$$

## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

---

- Complejidad Simplex Revisado:

$$B_{m \times m}^{-1}$$

La complejidad del algoritmo simplex aumenta al aumentar el número de **restricciones**

## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

---

¡ Sólo necesitamos tener almacenada  $B^{-1}$  !

¡ El resto de datos se calculan a partir de  $B^{-1}$  y los datos originales del modelo !

**Ejemplo:**      Modelo con **50** Variables y **10** Restricciones ( $\leq$ )  
Modelo en forma estándar:  
**60** Variables (Decisión + Holgura)  
**10** Ecuaciones

**SIMPLEX:**

Número de  $\alpha_{ij}$  = 600 datos reales

**SIMPLEX REVISADO:**

$B_{10 \times 10}^{-1} \rightarrow$  100 datos reales

## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

---

### ■ Algoritmo Simplex Revisado:

0. Solución básica factible inicial ( $SB_0$ )
1. Prueba de optimalidad:  
Calcular  $c_j - z_j \forall$  variable no básica  
Si solución óptima: → **FIN**  
En otro caso: Seleccionar **JE**
2. Calcular  $y_{JE}$
3. Seleccionar **IS** →  $\min \left\{ \frac{x_B}{y_{JE}} \right\}$
4. **Cambio de base:** Actualizar  $B^{-1}$ ; calcular  $X_B$ , Calcular  $Z$   
**Ir al paso 1**

## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

---

- Aplicaremos el algoritmo Simplex Revisado al problema ejemplo:
- **Modelo en forma estándar:**

$$\text{Max } Z = 3x_1 + 5x_2$$

s.a:

$$x_1 + x_3 = 4$$

$$2x_2 + x_4 = 12$$

$$3x_1 + 2x_2 + x_5 = 18$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 \geq 0$$



## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

- Solución Básica inicial ( $SB_0$ ) – Punto O:

Variables básicas:  $x_B = \begin{pmatrix} x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{pmatrix}$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \mathbf{B}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$x_B = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{b} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 4 \\ 12 \\ 18 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 \\ 12 \\ 18 \end{pmatrix}$$

$$z_0 = c_B^t x_B = (0, 0, 0) \begin{pmatrix} 4 \\ 12 \\ 18 \end{pmatrix} = 0$$



## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

Tabla Simplex Revisado  $SB_0$

v.básicas	$B^{-1}$			$x_B$
<b>x3</b>	1	0	0	<b>4</b>
<b>x4</b>	0	1	0	<b>12</b>
<b>x5</b>	0	0	1	<b>18</b>
$C_B^t B^{-1}$	0	0	0	<b>Z = 0</b>

## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

### 1. Prueba de optimalidad $SB_0$ :

Calcular  $c_j - z_j \forall$  variable no básica  $\rightarrow x_1, x_2$

$$z_j = c_B^t y_j = (c_B^t B^{-1}) a_j$$

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow B^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$c_B^t B^{-1} = (0, 0, 0) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = (0, 0, 0)$$

$$z_{x_1} = (0, 0, 0) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix} = 0; \quad z_{x_2} = (0, 0, 0) \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix} = 0$$

$$c_{x_1} - z_{x_1} = 3 - 0 = 3; \quad c_{x_2} - z_{x_2} = 5 - 0 = 5$$

**JE  $\rightarrow$  X2**

## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

2. Calcular  $y_{x2}$ :

$$y_{x2} = B^{-1} a_{x2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix}$$

3. Seleccionar IS  $\rightarrow \min \left\{ \frac{x_B}{y_{x2}} \right\}$

Tabla Simplex Revisado  $SB_0$

v.básicas	$B^{-1}$			$x_B$	$y_{x2}$	$\frac{x_B}{y_{x2}}$
x3	1	0	0	4	0	---
x4	0	1	0	12	2	12/2
x5	0	0	1	18	2	18/2
$c_B^t B^{-1}$	0	0	0	$Z = 0$		

**IS  $\rightarrow$  X4**

## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

4. Cambio de base: Actualizar  $B^{-1}$  para nueva base:

$$X_B = \begin{pmatrix} x_3 \\ x_2 \\ x_5 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

$$B^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

¿Cálculo?

## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

4. Cambio de base: Actualizar  $B^{-1}$  para nueva base:

$$\mathbf{X}_B = \begin{pmatrix} x_3 \\ x_2 \\ x_5 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \end{pmatrix} \quad \mathbf{B}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

**Cálculo de  $B^{-1}$  de la nueva solución, mediante las fórmulas del cambio de base aplicadas a  $B^{-1}$  anterior:**

$$\mathbf{B}^{-1}_{\text{anterior}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{y}_{x_2} = \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix} \begin{matrix} \leftarrow \text{Semipivote} \\ \leftarrow \text{Pivote} \\ \leftarrow \text{Semipivote} \end{matrix}$$

Cálculo de la segunda fila:

$$\frac{0}{2} \quad \frac{1}{2} \quad \frac{0}{2} = 0 \quad 1/2 \quad 0$$

## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

▪ Cálculo de la primera fila

$$\begin{array}{ccccccc}
 & & 1 & 0 & 0 & & \\
 - & 0 & ( & 0 & 1/2 & 0 & ) \\
 - & - & - & - & - & - & - \\
 & & 1 & 0 & 0 & & 
 \end{array}$$

▪ Cálculo de la tercera fila

$$\begin{array}{ccccccc}
 & & 0 & 0 & 1 & & \\
 - & 2 & ( & 0 & 1/2 & 0 & ) \\
 - & - & - & - & - & - & - \\
 & & 0 & -1 & 1 & & 
 \end{array}$$

$$\mathbf{B}^{-1}_{\text{para la nueva SB}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

Entonces, la nueva SB es:

$$\mathbf{x}_B = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{b} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 4 \\ 12 \\ 18 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 \\ 6 \\ 6 \end{pmatrix}$$

## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

Tabla Simplex Revisado  $SB_1$

v.básicas	$B^{-1}$			$x_B$
<b>x3</b>	1	0	0	<b>4</b>
<b>x2</b>	0	1/2	0	<b>6</b>
<b>x5</b>	0	-1	1	<b>6</b>
$c_B^t B^{-1}$	0	5/2	0	<b>Z = 30</b>

$$Z_1 = c_B^t x_B = (0, 5, 0) \begin{pmatrix} 4 \\ 6 \\ 6 \end{pmatrix} = 30$$

## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

### 1. Prueba de optimalidad $SB_1$ :

Calcular  $c_j - z_j \forall$  variable no básica  $\rightarrow x_1, x_4$

$$z_j = c_B^t y_j = (c_B^t B^{-1}) a_j$$

$$c_B^t B^{-1} = (0, 5, 0) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} = (0, 5/2, 0)$$

$$z_{x_1} = (0, 5/2, 0) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix} = 0; \quad z_{x_4} = (0, 5/2, 0) \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = 5/2$$

$$c_{x_1} - z_{x_1} = 3 - 0 = 3;$$

$$c_{x_4} - z_{x_4} = 0 - 5/2 = -5/2$$

La solución actual NO es óptima

Es posible mejorar todavía el valor de la función objetivo

**JE  $\rightarrow$  X1**



## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

2. Calcular  $y_{x1}$

$$y_{x1} = B^{-1} a_{x1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix}$$

3. Seleccionar **IS**  $\rightarrow \min \left\{ \frac{x_B}{y_{x1}} \right\}$

Tabla Simplex Revisado SB<sub>1</sub>

<u>v.básicas</u>	$B^{-1}$			<u><math>x_B</math></u>	$y_{x1}$	$\frac{x_B}{y_{x1}}$
x3	1	0	0	4	1	4
x2	0	1/2	0	6	0	-
x5	0	-1	1	6	<b>3</b>	6/3
<u><math>c_B^t B^{-1}</math></u>	0	5/2	0	<b><math>Z = 30</math></b>		

$$Z_1 = \underline{c_B^t} \underline{x_B} = (0, 5, 0) \begin{pmatrix} 4 \\ 6 \\ 6 \end{pmatrix} = 30$$

**IS  $\rightarrow$  X5**

## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

4. Cambio de base: Actualizar  $B^{-1}$  para nueva base

$$\underline{x_B} = \begin{pmatrix} x_3 \\ x_2 \\ x_1 \end{pmatrix}; \quad B^{-1}_{\text{anterior}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

aplicando las fórmulas del cambio de base:

$$B^{-1}_{\text{para la nueva SB}} = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & -1/3 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & -1/3 & 1/3 \end{pmatrix}$$

$$\underline{x_B} = B^{-1} b = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & -1/3 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & -1/3 & 1/3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 4 \\ 12 \\ 18 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 6 \\ 2 \end{pmatrix}$$

## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

Entonces, la  $SB_2$  es:

<u>v.básicas</u>	$B^{-1}$			<u><math>x_B</math></u>
x3	1	1/3	-1/3	2
x2	0	1/2	0	6
x1	0	-1/3	1/3	2
				$Z = 36$

$$Z_2 = c_B^t x_B = (0, 5, 3) \begin{pmatrix} 2 \\ 6 \\ 2 \end{pmatrix} = 36$$

## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

### 1. Criterio de optimalidad SB<sub>2</sub>

Calcular  $\underline{c_j - z_j} \forall$  variable no básica  $\rightarrow x_4, x_5$

$$\underline{z_j} = \underline{c_B^t} \underline{y_j} = (\underline{c_B^t} B^{-1}) \underline{a_j}$$

$$\underline{c_B^t} B^{-1} = (0, 5, 3) \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & -1/3 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & -1/3 & 1/3 \end{pmatrix} = (0, 3/2, 1)$$

$$z_{x_4} = (0, 3/2, 1) \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = 3/2; \quad z_{x_5} = (0, 3/2, 1) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = 1$$

$$\underline{c_{x_4} - z_{x_4}} = 0 - 3/2 = -3/2;$$

$$c_{x_5} - z_{x_5} = 0 - 1 = -1$$

**LA SOLUCIÓN ACTUAL ES SOLUCIÓN ÓPTIMA**  
 **$(\underline{c_j - z_j} \leq 0, \forall x_j \text{ NB})$**

## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

### Interpretación Solución Óptima:

v.Básicas	B <sup>-1</sup>			x <sub>B</sub>
X3	1	1/3	-1/3	2
x2	0	1/2	0	6
x1	0	-1/3	1/3	2
c <sub>B</sub> <sup>t</sup> B <sup>-1</sup>	0	3/2	1	<b>Z = 36</b>

$$c_{x4} - z_{x4} = 0 - 3/2 = -3/2;$$

$$c_{x5} - z_{x5} = 0 - 1 = -1$$

Los departamentos 2 y 3 (calidad y montaje) son los recursos escasos de la empresa ya que en la solución óptima se utilizan por completo sus capacidades ( $x_4=x_5=0$ , son VNB).

A los recursos escasos les corresponde en general un coste de oportunidad  $\neq 0$ , en este caso:

- C.O. **depto. 2**:  $c_{x4} - z_{x4} = c_{x4} - c_B^t B^{-1} a_{x4} = -3/2$ , (restricción  $\leq$ ), **C.O. = +3/2**  
“el valor de la F.O. mejorará (aumentará) en 3/2 por unidad adicional de capacidad depto.2”
- C.O. **depto. 3**:  $c_{x5} - z_{x5} = c_{x5} - c_B^t B^{-1} a_{x5} = -1 \rightarrow$  **C.O.=+1** (idem depto.2)
- El **departamento 1** (producción) es de holgura en la solución óptima. **C.O.=0**

## Ejercicio Propuesto:

- Calcular la solución óptima del siguiente programa lineal aplicando el método **simplex revisado**

$$\text{MAXIMIZAR } Z = 600x_1 + 900x_2$$

s.a.

$$x_1 + 2x_2 \leq 200$$

$$1/2x_1 + x_2 \leq 175$$

$$x_1, x_2 \geq 0$$

en la solución óptima identificar los costes de oportunidad y los costes reducidos

## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

¿Cuál sería la solución óptima si el departamento 3 incrementara en 3 unidades su capacidad? ¿y en el caso de incrementarla en 9 unidades?

- A partir de la tabla de la solución óptima es posible responder a estas cuestiones.

$$[\text{depto.3}] \quad 3 X_1 + 2 X_2 + x_5 = 18$$

- $b_{\text{actual}}$  Depto. 3 = 18;  $b_{\text{nuevo}}$  Depto. 3 = 21

<u>v.básicas</u>	$B^{-1}$			<u><math>X_B</math></u>
x3	1	1/3	-1/3	2
x2	0	1/2	0	6
x1	0	-1/3	1/3	2
<u><math>c_B^t B^{-1}</math></u>	0	3/2	1	$Z = 36$

## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

- La *modificación de un bi no afecta a la optimalidad pero sí puede afectar a la factibilidad*, por tanto debemos recalcular  $x_B$  cuando  $b_3=21$  y comprobar si la solución sigue siendo factible (y por tanto óptima).

$$x_B = \begin{pmatrix} x_3 \\ x_2 \\ x_1 \end{pmatrix} = B^{-1} b = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & -1/3 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & -1/3 & 1/3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 4 \\ 12 \\ \textcolor{red}{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 6 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$Z = c_B^t x_B = (0, 5, 3) \begin{pmatrix} 1 \\ 6 \\ 3 \end{pmatrix} = 39$$



## 3.9 Algoritmo Simplex revisado

... ¿y si  $b_3$  se incrementa en 9 unidades?

- ▶ La modificación implica que el  $b_i$  del departamento 3 cuyo valor inicial es 18 pase a ser 27:

$$b_3 \rightarrow b_3 + \Delta 9$$

- ▶ **La modificación de un  $b_i$  no afecta a la optimalidad ( $c_j - c_B^t B^{-1} a_j$  no varía) pero sí puede afectar a la factibilidad.**

Por tanto debemos recalcular  $x_B$  cuando  $b_3=27$  y comprobar si la solución sigue siendo factible (y por tanto óptima)

$$x_B = \begin{pmatrix} x_3 \\ x_2 \\ x_1 \end{pmatrix} = B^{-1} b = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & -1/3 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & -1/3 & 1/3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 4 \\ 12 \\ \textcircled{27} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 6 \\ 5 \end{pmatrix} \leftarrow \dots$$

**SOLUCIÓN NO FACTIBLE ( $b_3=27$ )**

## 3.10 Algoritmo simplex dual

---

¿es posible alcanzar la factibilidad a partir de esta solución?



### ALGORITMO SIMPLEX DUAL

- **OBJETIVO:** a partir de una SB que cumple el criterio de optimalidad primal y es **no factible**, encontrar una  $SB_{\text{adyacente}}$  **factible** ( $x_B \geq 0$ )

## 3.10 Algoritmo simplex dual

---

- ▶ Variante del Algoritmo Simplex que se aplica para re-optimizar un problema cuando:
  - ▶ Se ha modificado algún parámetro del modelo que ha hecho que la solución óptima haya **dejado de ser factible**.
- ▶ Se diferencia del algoritmo Primal del Simplex en el orden en el que se escoge la variable que entra y la variable que sale en la solución básica.

## 3.10 Algoritmo simplex dual

---

### Algoritmo Simplex:

Algoritmo **Simplex Primal**:      1º: **JE**  
   2º: **IS**  
   3º: **Cambio de base**

Algoritmo **Simplex Dual**:      1º: **IS**  
   2º: **JE**  
   3º: **Cambio de base**

## 3.10 Algoritmo simplex dual

### ALGORITMO SIMPLEX DUAL

► PASOS:

1. Determinar variable **IS**: sale de la base la variable con **bi más negativo**:

$$\text{IS: } x_i / b_{xi} = \min\{ b_i \mid b_i < 0 \}$$

2. Determinar variable **JE**: para conseguir que la factibilidad mejore y que el valor de la función objetivo **empeore lo menos posible**, se seleccionará para entrar en la base una variable **xj** cuyo **y<sub>ij</sub> < 0** tal que:

$$\text{JE: } x_j / \left| \frac{C_{xj} - Z_{xj}}{y_{xj}} \right| = \min_{1 \leq k \leq n} \left\{ \left| \frac{C_{xk} - Z_{xk}}{y_{xk}} \right| \mid y_{xk} < 0 \right\}$$

(Con el módulo se permite definir un único criterio para maximizar o minimizar)



## 3.10 Algoritmo simplex dual

---

3. Cambio de base:  $\rightarrow$  **Actualizar  $B^{-1}$** ;

Calcular nueva solución:  $x_B, Z$

En el caso de **no existir alguna VNB con valor estrictamente negativo** en la fila de la variable que sale, el problema que estamos tratando de resolver es **no factible**

### CRITERIO DE OPTIMALIDAD (dual)

Una solución  $x_B$  es óptima si es factible ( $x_i \geq 0 \ \forall i$ )

## 3.10 Algoritmo simplex dual

- ▶ Aplicando el **algoritmo dual del simplex** a la tabla de la solución óptima (cuando **b3=27**):

v.básicas	$B^{-1}$			$x_B$
x3	1	1/3	-1/3	-1
x2	0	1/2	0	6
x1	0	-1/3	1/3	5
$c_B^t B^{-1}$	0	3/2	1	<b>Z = 45</b>

$$c_{x4} - z_{x4} = -3/2; \quad c_{x5} - z_{x5} = -1$$

## 3.10 Algoritmo simplex dual

1. Elegir IS:  $x_i / b_{xi} = \min\{b_i \mid b_i < 0\}$

**IS  $\rightarrow$  x3**

2. Elegir JE:  $x_j / \left| \frac{c_{xj} - z_{xj}}{y_{xj}} \right| = \min_{1 \leq k \leq n} \left\{ \left| \frac{c_{xk} - z_{xk}}{y_{xk}} \right| \mid y_{xk} < 0 \right\}$

Variables no básicas:  $x_{NB} = \begin{pmatrix} x4 \\ x5 \end{pmatrix}$

$$y_{x4} = B^{-1} a_{x4} = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & -1/3 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & -1/3 & 1/3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/3 \\ 1/2 \\ -1/3 \end{pmatrix}$$

$$y_{x5} = B^{-1} a_{x5} = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & -1/3 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & -1/3 & 1/3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1/3 \\ 0 \\ 1/3 \end{pmatrix}$$

**JE  $\rightarrow$  x5**



## 3.10 Algoritmo simplex dual

3. Cambio de base: Actualizar  $B^{-1}$ ;

Calcular la nueva solución:  $X_B, Z$

v.básicas	$B^{-1}$			$x_B$
x5	-3	-1	1	3
x2	0	1/2	0	6
x1	1	0	0	4
$c_B^t B^{-1}$	3	5/2	0	<b>Z = 42</b>

$$c_{x3} - z_{x3} = -3 \quad ; \quad c_{x4} - z_{x4} = -5/2$$

4. Criterio de optimalidad (dual):

$x_i > 0 \quad \forall i$ , por tanto la solución actual es **SOLUCIÓN ÓPTIMA**

## 3.10 Algoritmo simplex dual

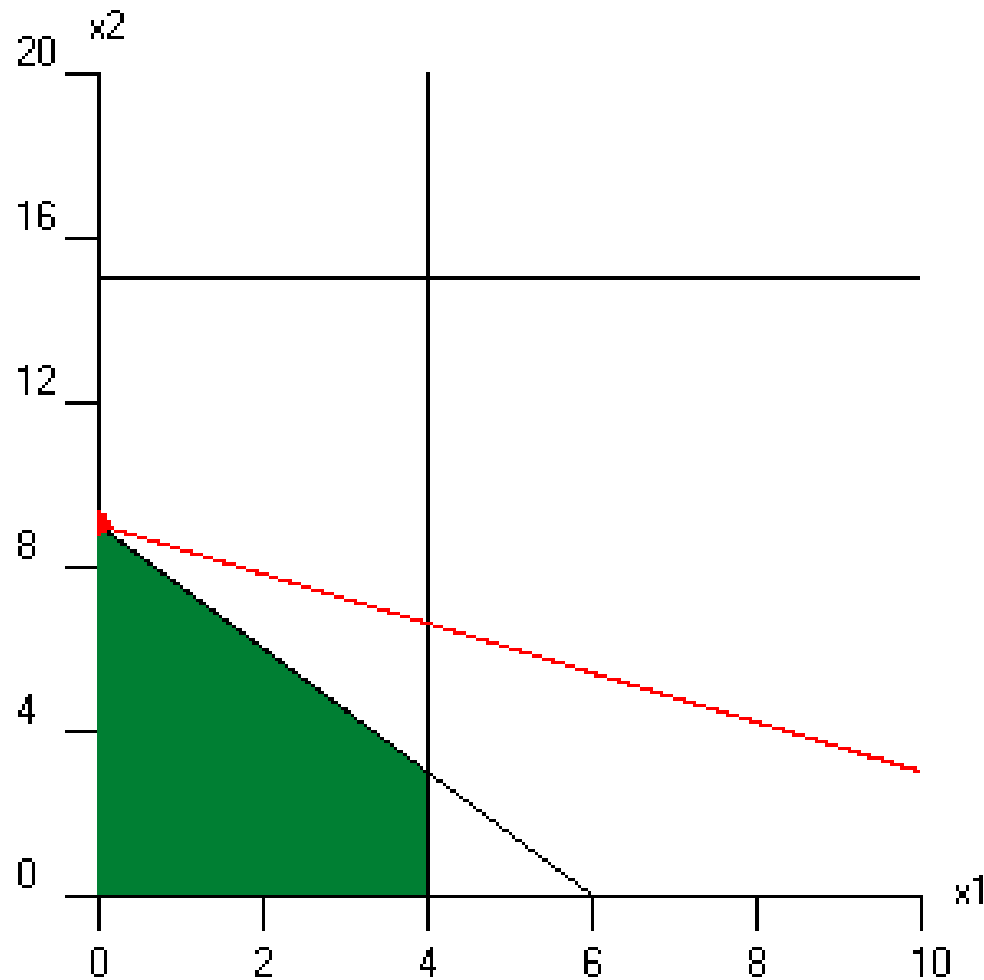
---

### Ejercicio Propuesto:

- La capacidad del Departamento 2 aumenta de 12 a 30 hrs.
- Obtener la S.O. y el valor de  $Z$  a partir de la S.O. del problema original aplicando el algoritmo simplex dual.



## 3.10 Algoritmo simplex dual



### Solución

Tipo de solución :	Solución óptima
Función objetivo :	45
Valor $x_1$ :	0
Valor $x_2$ :	9

# Ejercicios Propuestos

---

Obtener la solución óptima de los siguientes programas lineales aplicando el algoritmo **simplex revisado**:

a)  $\text{Max } Z = 5 x_1 + 2 x_2$

s.a:  $3 x_1 + x_2 \leq 12$

$$x_1 + x_2 \leq 5$$

$$x_1, x_2 \geq 0$$

**SOLUCIÓN:  $x_1=3.5$ ;  $x_2=1.5$ ;  $Z = 20.5$**

b)  $\text{Max } Z = 24 x_1 + 20 x_2$

s.a:  $0.5 x_1 + x_2 \leq 12$

$$1.5 x_1 + x_2 \leq 24$$

$$x_1, x_2 \geq 0$$

**SOLUCIÓN:  $x_1=12$ ;  $x_2=6$ ;  $Z = 408$**

# Material complementario...

***Winston,W., Operations Research: Applications and Algorithms, 4<sup>th</sup> edition***

**Chapter 3: Introduction to Linear Programming**

**3.2 The Graphical Solution of Two-Variable Linear Programming Problems**

**Chapter 4: The Simplex Algorithm and Goal Programming**

**4.1 How to Convert an LP to Standard Form**

**4.2 Preview of the Simplex Algorithm**

**4.3 Direction of Unboundedness**

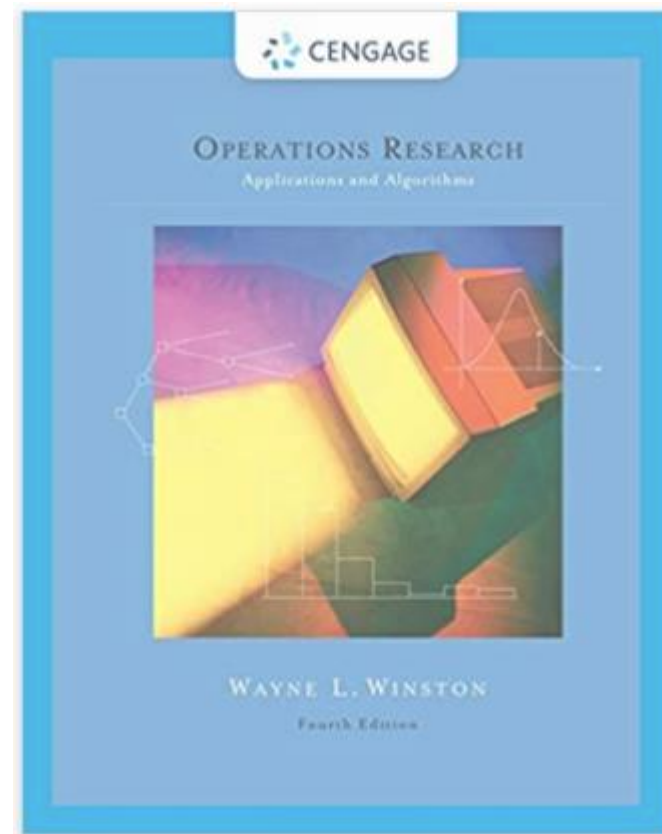
**4.4 Why Does an LP Have an Optimal bfs?**

**4.5 The Simplex Algorithm**

**4.6 Using the Simplex Algorithm to Solve Minimization Problems**

**4.7 Alternative Optimal Solutions**

**4.8 Unbounded LPs**



# Material complementario...

***Winston, W., Operations Research: Applications and Algorithms, 4<sup>th</sup> edition***

**Chapter 5: Sensitivity Analysis: An applied approach**

**5.1 A Graphical Introduction to Sensitivity Analysis**

**5.2 The Computer and Sensitivity Analysis**

**5.3 Managerial Use of Shadow Prices**

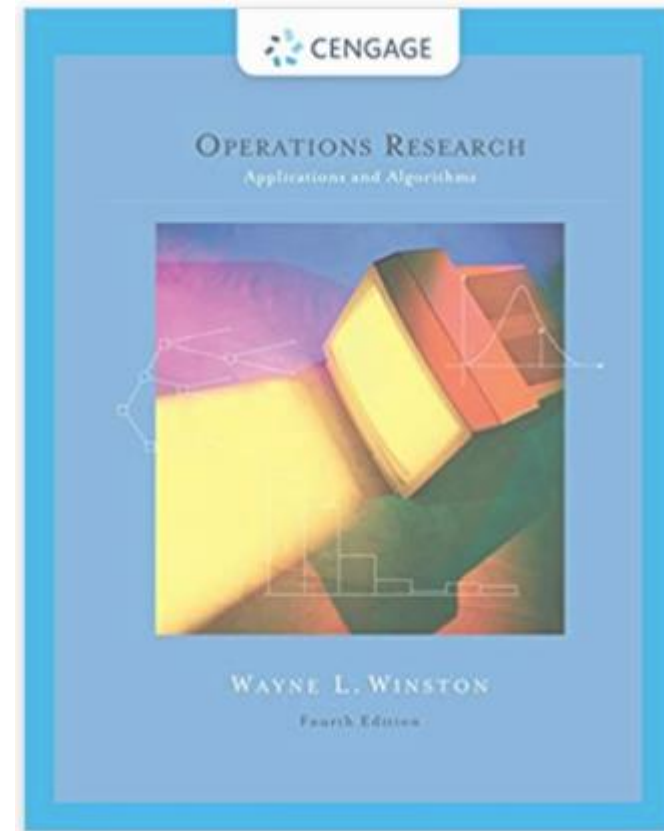
**5.4 What Happens to the Optimal  $z$ -Value If the Current Basis Is No Longer Optimal?**

**Chapter 10: Advanced Topics in Linear Programming**

**10.1 The Revised Simplex Algorithm**

**Chapter 6: Sensitivity Analysis and Duality**

**6.11 The Dual Simplex Method**



## Material complementario...

### *Winston,W., Investigación de Operaciones: Aplicaciones y algoritmos, 4ª edición*

#### Capítulo 3 Introducción a la programación lineal

**3.2** Solución gráfica de los problemas de programación lineal de dos variables

#### Capítulo 4: Algoritmo simplex y la programación por objetivos

**4.1** Cómo convertir un PL en una forma estándar

**4.2** Preliminares del algoritmo simplex

**4.3** Dirección de no acotamiento

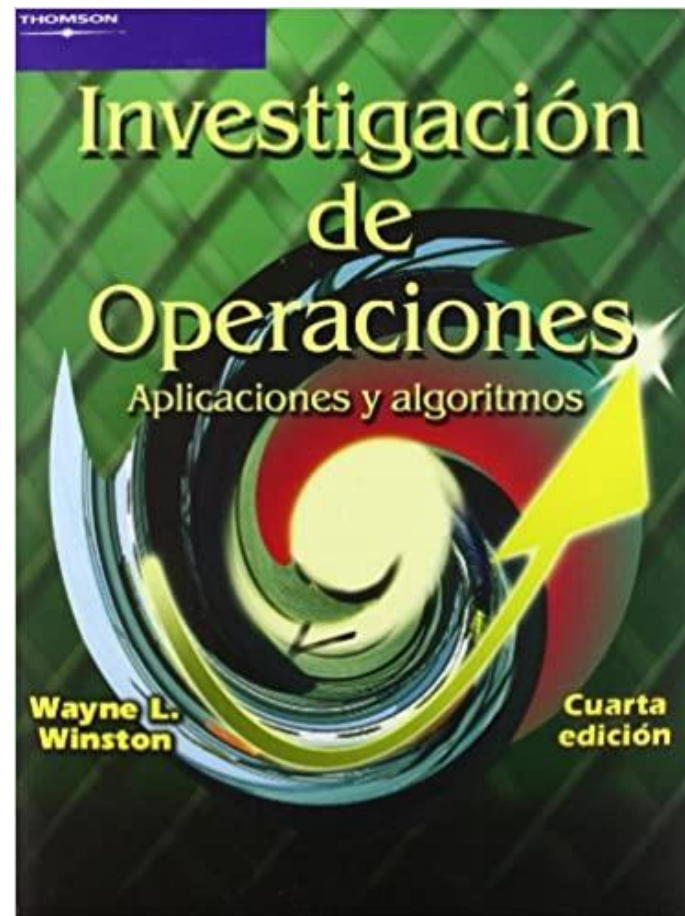
**4.4** ¿Por qué un PL tiene una solución óptima?

**4.5** Algoritmo simplex

**4.6** Solución de problemas de minimización mediante el algoritmo simplex

**4.7** Soluciones óptimas alternativas

**4.8** PL no acotados



## Material complementario...

### *Winston,W., Investigación de Operaciones: Aplicaciones y algoritmos, 4ª edición*

#### Capítulo 5: Análisis de sensibilidad: un enfoque aplicado

- 5.1 Introducción gráfica al análisis de sensibilidad
- 5.2 La computadora y el análisis de sensibilidad
- 5.3 Aplicación administrativa de los precios sombra
- 5.4 ¿Qué sucede con el valor óptimo de  $z$  si la base actual ya no es óptima?

#### Capítulo 10: Temas avanzados de programación lineal

- 10.1 Algoritmo del método simplex revisado

#### Capítulo 6: Análisis de sensibilidad y dualidad

- 6.11 Método simplex para el dual

