UNIVERSIDAD DE LIMA

Manual básico de Solver Excel

Versión 3.2

Herberth E. Gutiérrez Villaverde
Universidad de Lima
Hgutierr@ulima.edu.pe

Ciclo 2021-2

ÍNDICE

Introducción

El Solver es un complemento del Excel, que viene como parte de otros programas de su biblioteca. Su objetivo es realizar problemas de optimización de programación lineal continua, en enteros y programación no lineal. También permite la solución de problemas de optimización usando algoritmos genéticos. El Solver de Excel está disponible en todas las hojas de Excel, pero como ocupa memoria es necesario cargarlo antes de usarlo.

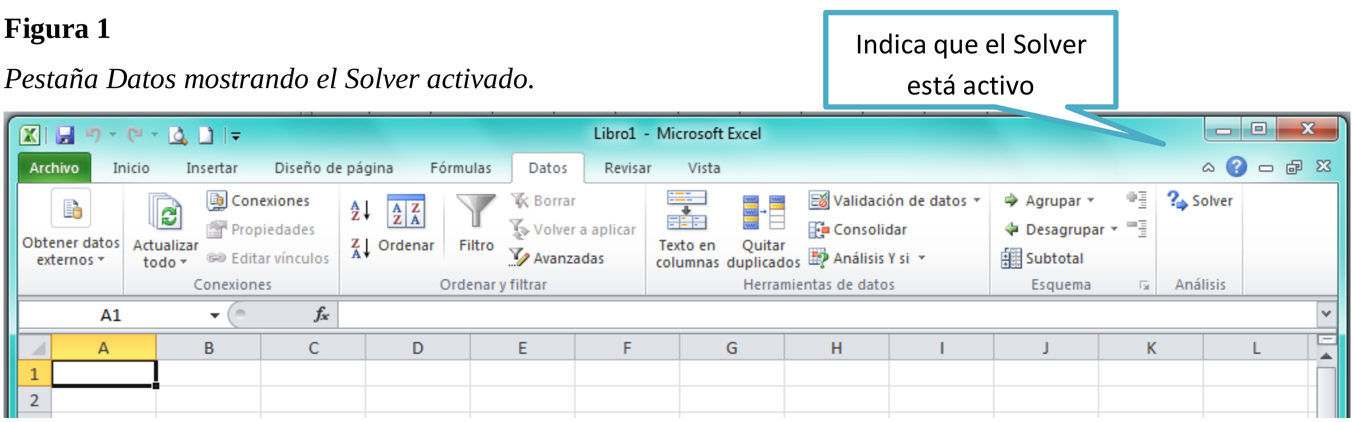
En este manual se describe el proceso de solución de problemas de optimización con Solver, empezando desde la carga del programa, la descripción de las opciones para el uso del Solver y mostrando algunos ejemplos en forma detallada, incluyendo la interpretación de los resultados. Es importante su uso puesto que permite la elaboración de reportes gerenciales a partir de la solución encontrada en la misma hoja. Como parte de este manual se adjunta un libro con los ejemplos descritos.

Instalación del Solver

Normalmente el Solver no está activo cuando se carga el Excel por que ocupa memoria. Por lo tanto, lo primero que se tiene que hacer es revisar si tenemos activo el Solver, seleccionando la pestaña ***Datos***. Si el Solver está cargado se verá en el extremo derecho de la cinta:

Figura 1

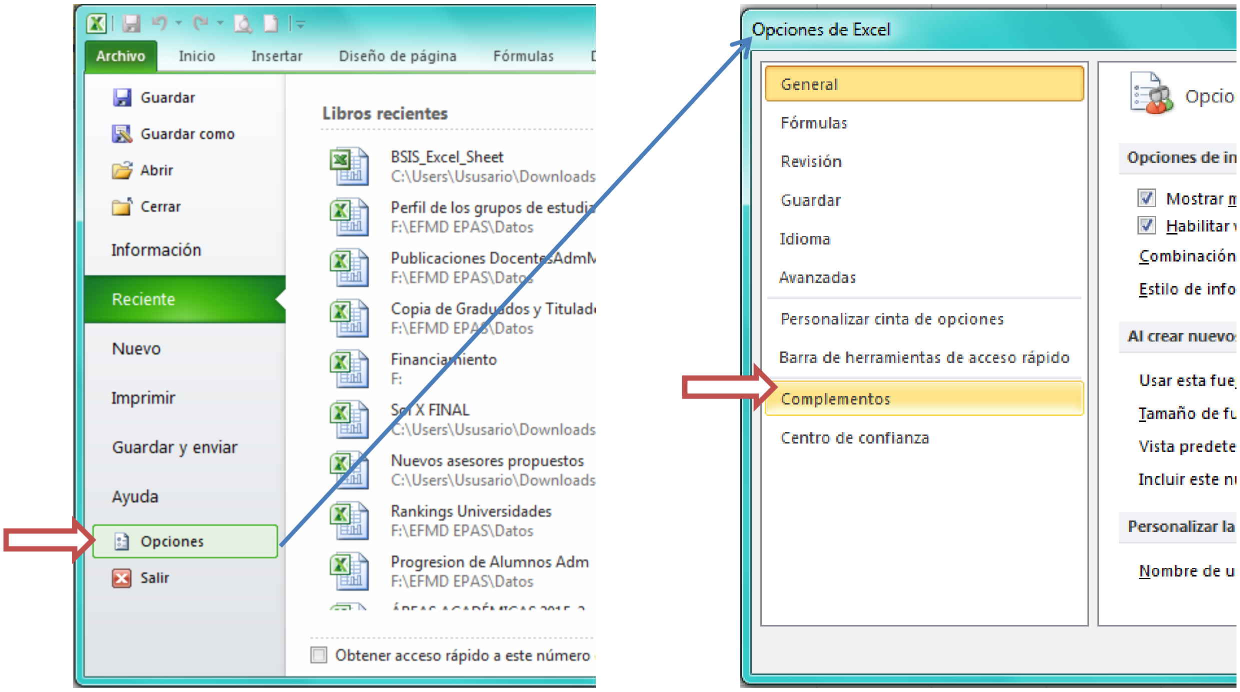
Pestaña Datos mostrando el Solver activado.



Si el Solver no está activo, hay que cargarlo, para lo que es necesario hacer lo siguiente: en la pestaña ***Archivo*** seleccionar ***Opciones*** y en esta ventana seleccionar ***Complementos*:**

Figura 2

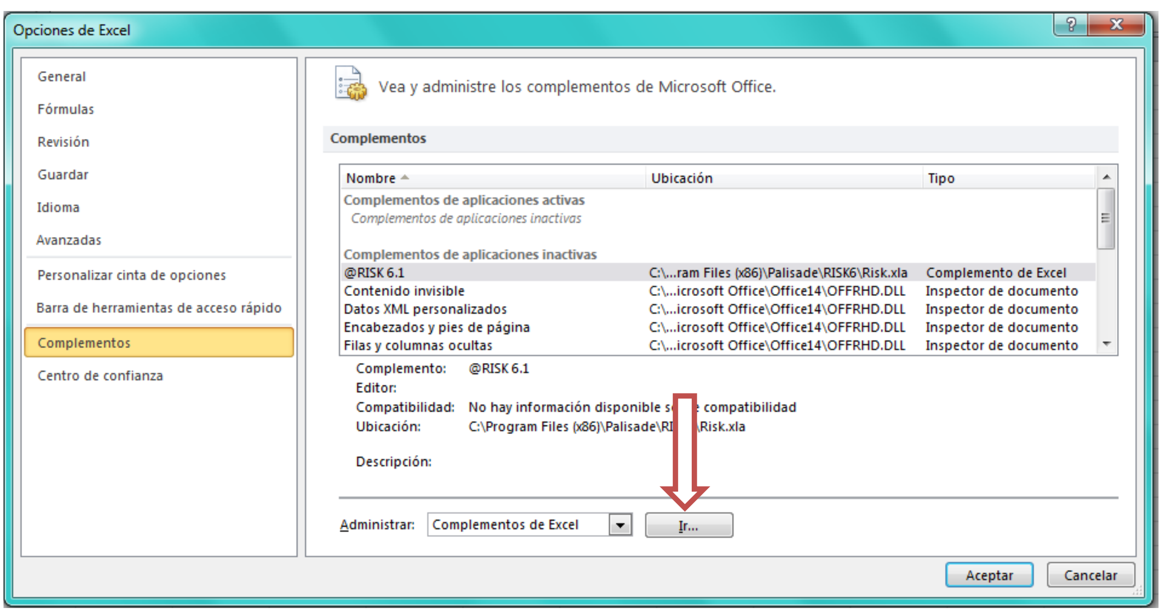
Localizando la opción Complementos para activar el Solver



Después de seleccionar ***Complementos,*** en la parte inferior de la ventana aparece la opción de *Complementos de Excel* y para acceder a ellos presionar el botón ***Ir…***

Figura 3

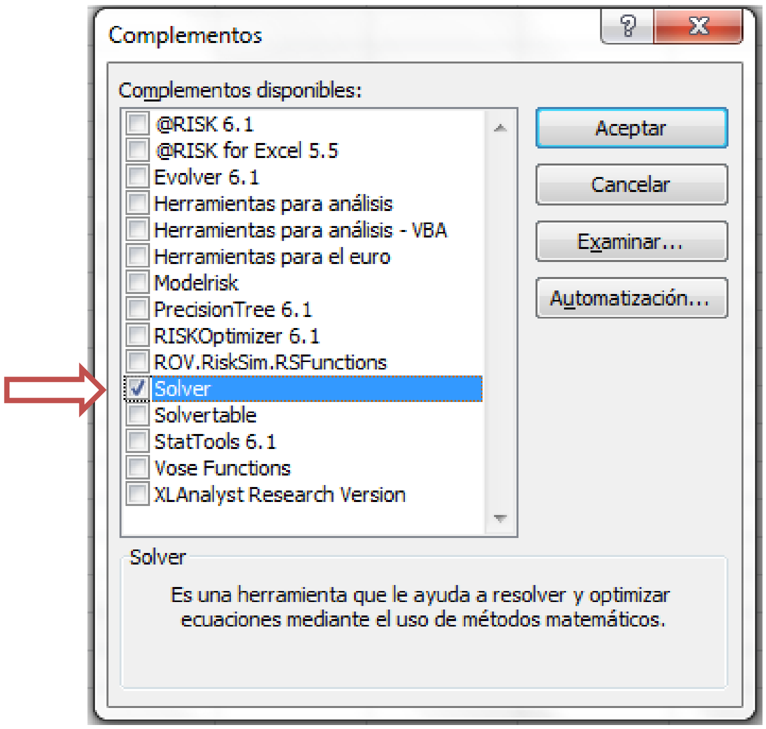
Activación de los complementos disponibles en Excel.



Finalmente, aparece la ventana con los complementos de Excel disponibles, entre ellos el Solver. Para cargarlo hacemos click en el recuadro Solver y presionamos el botón ***Aceptar.***

Figura 4.

Activación del complemento Solver



Después de esto veremos en la pestaña ***Datos*** el Solver ya cargado.

Solución con Solver de un problema de programación lineal de mezclas

Para aprender el uso del Solver, se usará el siguiente problema de mezclas. Una empresa al sur de Lima que se dedica a la comercialización de pollos requiere preparar una mezcla diaria de 2,000 Kg. de alimentos balanceados, con requerimientos nutricionales en proteínas, vitaminas y calcio. Para la preparación de la mezcla la empresa usa como materia prima: harina de pescado, soya y productos carbonatados.

En la tabla 1, se proporcionan los requerimientos de la mezcla alimenticia para los pollos, así como los costos de la materia prima y los contenidos de los nutrientes respectivos:

Tabla 1.

Requerimientos de la mezcla alimentaria

Materia Prima	Costo S/. Kg.	Proteínas Unidades/Kg.	Vitaminas Unidades/Kg.	Calcio Unidades/Kg.
Harina de Pescado	10	1200	6000	3000
Soya	5	800	1000	1500
Productos carbonatados	15	40	100	8000
Requerimiento Mínimo		900	4000	2000
Requerimiento Máximo		-	-	6000

Formular un problema lineal para encontrar la mezcla más económica. En esta oportunidad no se discutirá el proceso de formulación del modelo, puesto que el interés es aprender a usar el Solver. Así que se proporciona la formulación del modelo en forma algebraica:

Sea: X1 = Kg de harina de pescado a usar.

X2 = Kg de soya a usar.

X3 = kg de productos carbonatados a usar.

MIN Z =10X1 + 5X2 + 15X3	Minimizar el costo de la mezcla
s.a.:	
X1 + X2 + X3 = 2000	Peso requerido en la mezcla
0.6 X1 + 0.40 X2 + 0.02 X3 >= 900	Requerimiento mínimo de proteínas
3 X1 + 0.50 X2 + 0.05 X3 >= 4000	Requerimiento mínimo de vitaminas
1.5 X1 + 0.75 X2 + 4 X3 >= 2000	Requerimiento mínimo de calcio
1.5 X1 + 0.75 X2 + 4 X3 <= 6000	Requerimiento máximo de calcio
X1, X2, X3 >= 0	

La solución de un problema en Excel tiene los siguientes pasos:

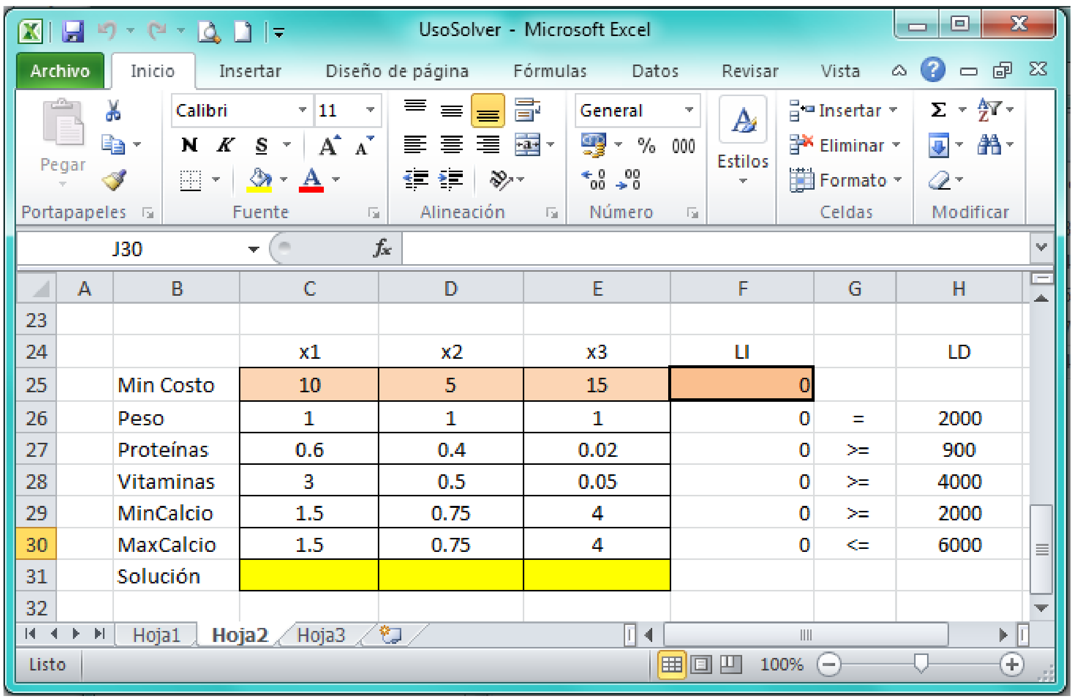
a. Desarrollo de una representación del modelo en la hoja electrónica.
b. Indicación de la celda que contiene la Función Objetivo.
c. Especificación de las variables de decisión, que se conocen como ¨celdas cambiantes¨
d. Especificación de las celdas que contienen las restricciones
e. Solución del modelo e interpretación de los resultados

A continuación, se desarrollará cada uno de estos pasos.

En la hoja de la Figura 5, se ha plasmado una representación del modelo descrito arriba con los coeficientes de la función objetivo en las celdas C25:E25, los coeficientes de las restricciones en las celdas C26:E30 y los valores de los lados derechos en las celdas H26:H30. En las celdas C31:E31 aparecerán los valores de X1, X2 y X3 una vez resuelto el problema. Estas celdas pintadas de amarillo (solo por conveniencia), se conocen como ¨celdas cambiantes¨, porque en el proceso de encontrar la solución irán cambiando hasta tener un valor óptimo.

Figura 5

Representación del modelo en hoja electrónica



	A	B	C	D	E	F	G	H
23								
24			x1	x2	x3	LI		LD
25		Min Costo	10	5	15	0		
26		Peso	1	1	1	0	=	2000
27		Proteínas	0.6	0.4	0.02	0	>=	900
28		Vitaminas	3	0.5	0.05	0	>=	4000
29		MinCalcio	1.5	0.75	4	0	>=	2000
30		MaxCalcio	1.5	0.75	4	0	<=	6000
31		Solución						
32								

Se debe observar que hasta el momento solo se ha colocado los coeficientes de la función objetivo y de las restricciones, pero no hemos expresado como son las expresiones matemáticas. Tomemos como ejemplo la restricción del Peso requerido en la mezcla:

$$\underbrace{X1 + X2 + X3}_{\text{Lado izquierdo (LI) de la restricción}} = \underbrace{2000}_{\text{Lado derecho (LD) de la restricción}}$$

En la hoja electrónica en las celdas C26:E26 solo se han colocado los coeficientes de X1, X2 y X3, pero no se ha establecido que la suma de 1 x X1 más 1 x X2 más 1 x X3, es decir, X1 +X2 + X3, es el lado izquierdo de la restricción. Para construir el lado izquierdo de la restricción del peso requerido de la mezcla se debe incluir en la celda F26 la siguiente fórmula:

=C31*C26+D31*D26+E31*E26

De igual manera se debe construir los lados izquierdos del resto de restricciones en las celdas F27:F30:

=C31*C27+D31*D27+E31*E27 (Lado izquierdo de la restricción de proteínas)

=C31*C28+D31*D28+E31*E28 (Lado izquierdo de la restricción de vitaminas)

=C31*C29+D31*D29+E31*E29 (Lado izquierdo de la restricción del mínimo de Calcio)

=C31*C30+D31*D30+E31*E30 (Lado izquierdo de la restricción de máximo de Calcio)

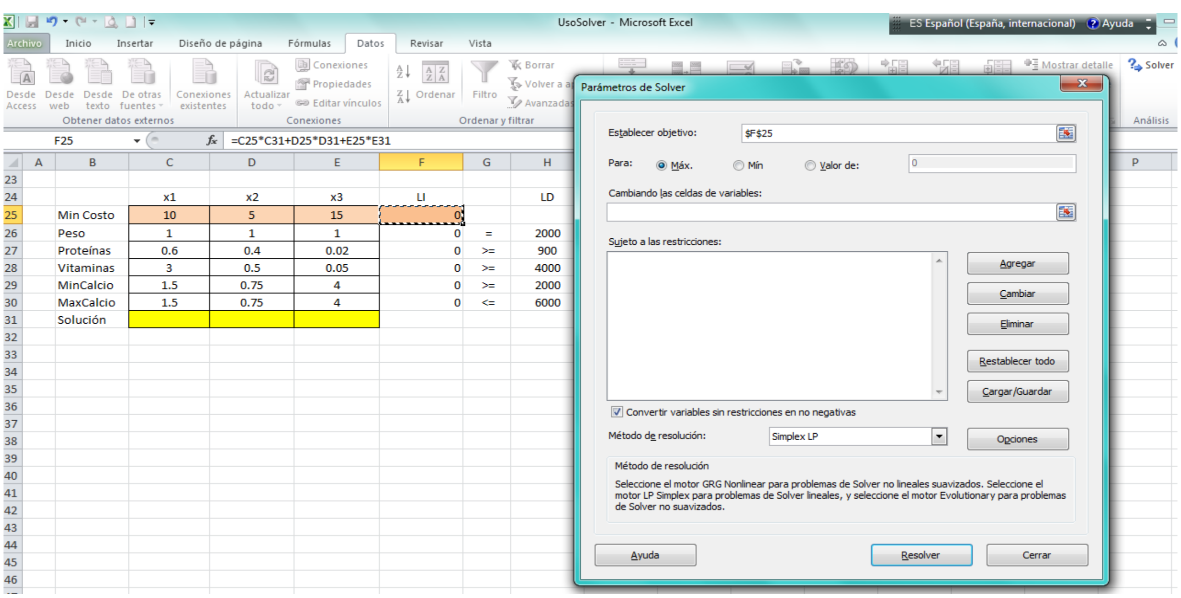
De manera análoga se debe construir la expresión de la función objetivo en la celda F25:

=C25*D31+D25*D31+E25*E31

En este momento ya está todo listo para ingresar el modelo al Solver. Para ello, hagamos un click sobre la celda que tiene la función objetivo: F25. Luego se selecciona la opción Solver en la pestaña Datos e inmediatamente aparecerá la ventana de Parámetros del Solver.

Figura 6

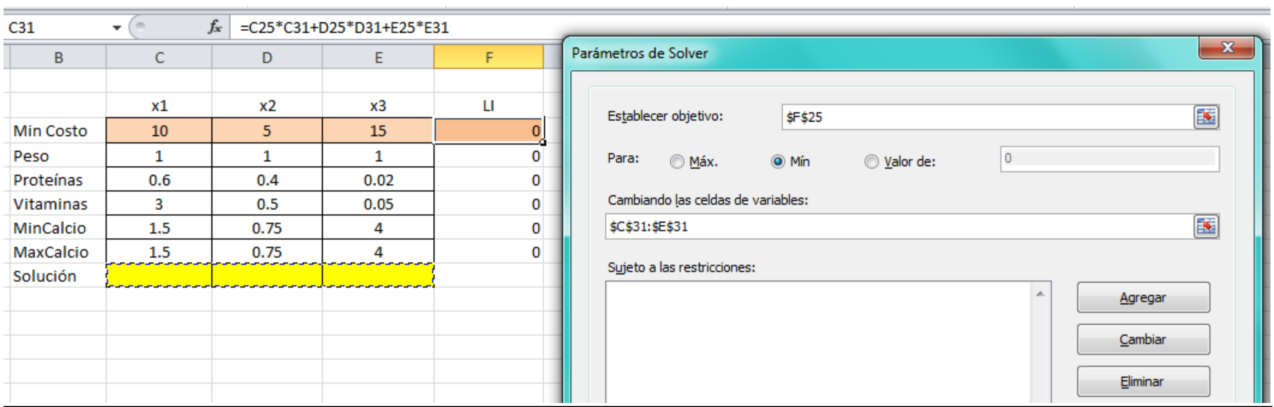
Activación del Solver y carga de la ventana de Parámetros del Solver



Como se puede observar, el recuadro “Establecer objetivo:” ya tiene la celda que corresponde a la función objetivo, en este caso la celda F25. En el campo “Para:” marcar la opción “Min” porque se va a minimizar el costo de la mezcla. En el recuadro “Cambiando las celdas de variables:” hay que indicar las celdas que contiene a las variables de decisión o “celdas cambiantes”, en este problema las celdas C31:E31 (las celdas en amarillo). Hasta el momento la ventana de parámetros del Solver debe verse como en la Figura 7.

Figura 7

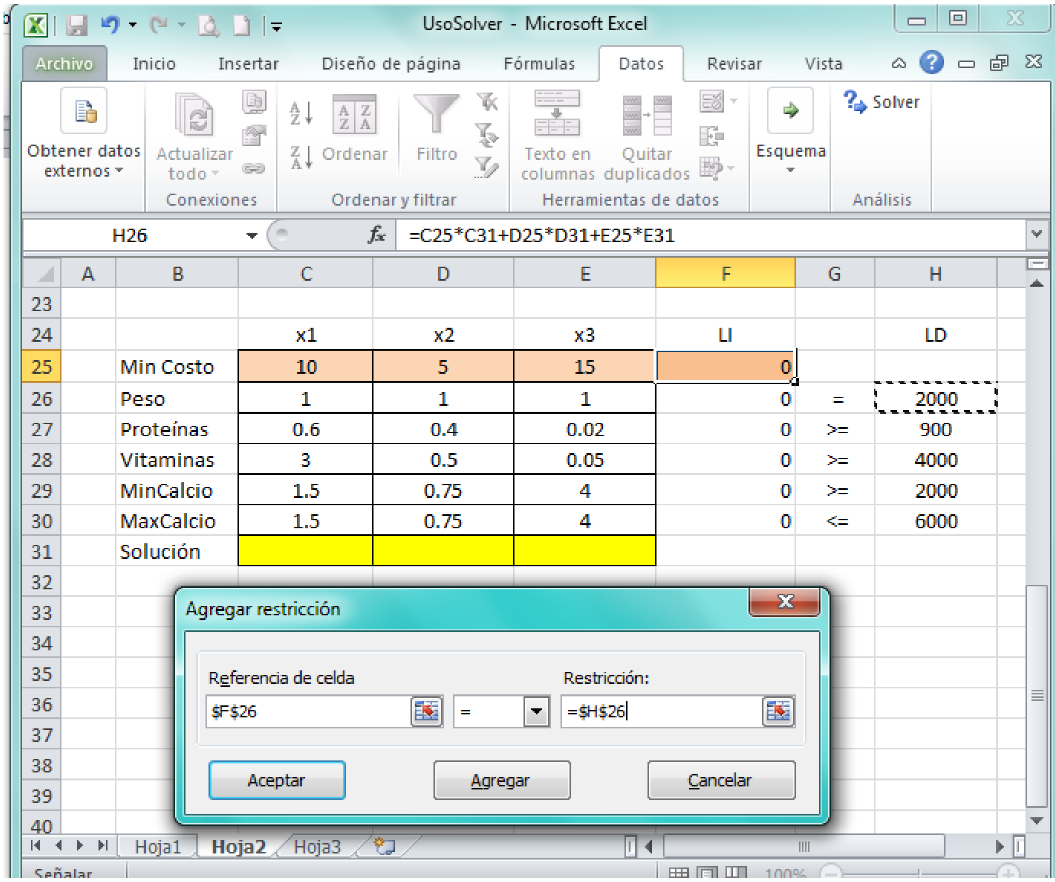
Ingreso de la celda objetivo, tipo de optimización y las variables de decisión



Ahora se tiene que indicar al Solver como están conformadas las restricciones, para ello se usa el recuadro “Sujeto a las restricciones:”. Se inicia el ingreso de las restricciones presionando el botón “Agregar”, después de lo cual aparecerá la ventana “Agregar restricción” con tres campos para ingresar la dirección del lado izquierdo, indicar el tipo de restricción =, > o < y poner la dirección del lado derecho de cada restricción, como se muestra el caso de la restricción del peso de la mezcla en la Fig. 8.

Figura 8

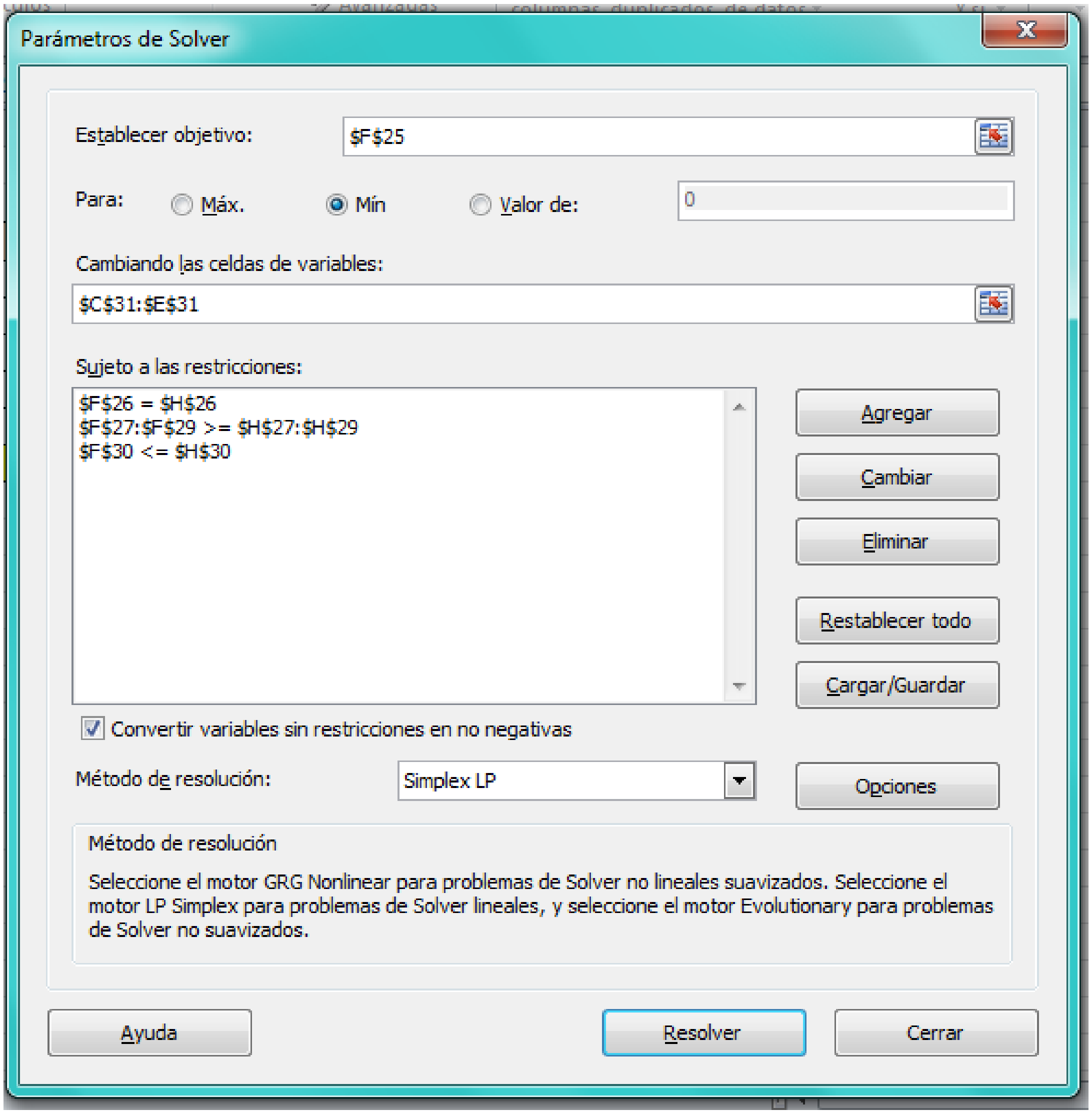
Ingreso de las restricciones del problema.



De manera análoga se puede ingresar las demás restricciones, después de lo cual se tendrá:

Figura 9

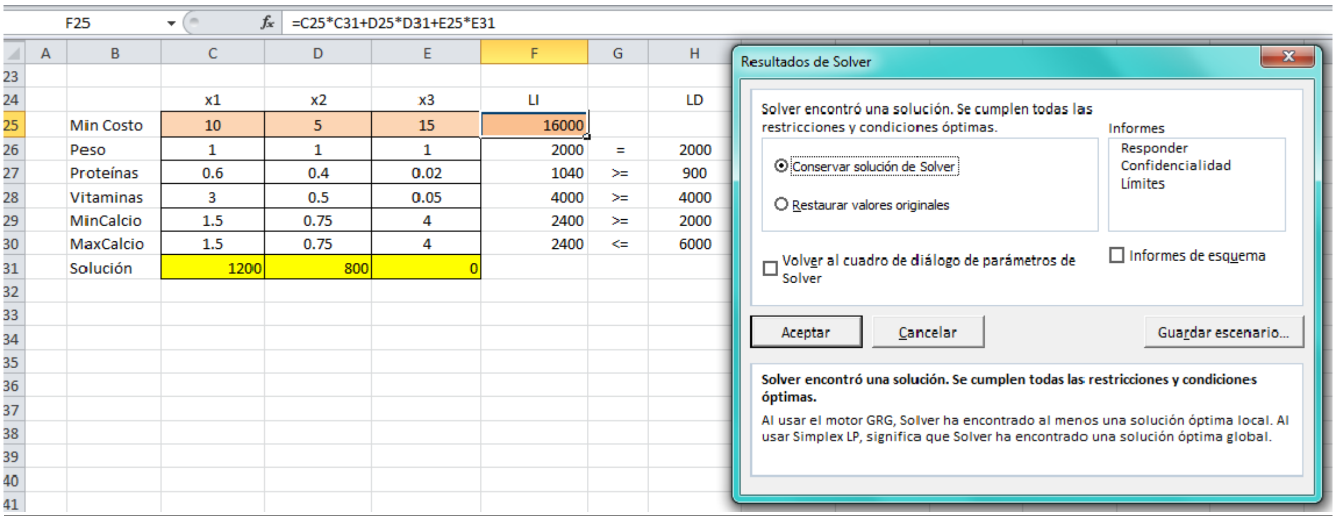
Modelo ingresado en la ventana de parámetros de Solver



Adicionalmente, notar que se tiene que marcar el cajón de "Convertir variables sin restricciones en no negativas", que es el equivalente a decir que los Xj >= 0. Así mismo, puesto que se está en programación lineal, el "Método de resolución:" debe ser el **Simplex LP**. En este punto ya se está en posición de presionar el botón "Resolver" para que el Solver inicie los cálculos internos y comunique si el problema tiene solución o si se ha presentado algún inconveniente. Como se ve en la Figura 10, después de presionar "Resolver" el Solver muestra la ventana "Resultados del Solver", con el mensaje: "Solver encontró una solución. Se cumplen todas las restricciones y condiciones óptimas" y en la hoja del modelo se puede apreciar que los valores de las variables de decisión X1, X2 y X3, tienen los valores de 1200, 800 y 0 respectivamente en las celdas en amarillo.

Figura 10

Ventana de resultados del Solver



La solución del problema es:

Materia Prima	Cantidad Kg.	Costo S/.
Harina de Pescado	1200	12,000
Soya	800	4,000
Productos carbonatados	0	0
Costo total, S/.		16,000

La composición de la mezcla por kg es:

	Proteínas Unidades/Kg.	Vitaminas Unidades/Kg.	Calcio Unidades/Kg.
Contenido en la mezcla	1,040	4,000	2,400
Requerimiento Mínimo	900	4,000	2,000
Requerimiento Máximo	-	-	6,000

El modelo arriba formulado haciendo una analogía con la forma algebraica del problema, se puede formular de forma "implícita", construyendo en la hoja de cálculo de forma libre las restricciones y la función objetivo.

En la siguiente formulación, se ha abierto una columna (pintada de amarillo), que contiene las variables de decisión y más abajo se han construido las restricciones, como se muestra en las figuras 11 y 12.

Figura 11

Formulación "implícita" del problema.

	A	B	C	D	E	F	G
12			Materia Prima	Costo	Proteínas	Vitaminas	Calcio
13		Materia Prima	a usar, Kg	S/. Kg.	Unidades/Kg.	Unidades/Kg.	Unidades/Kg.
14		Harina de Pescado	1200	10	1,200	6,000	3,000
15		Soya	800	5	800	1,000	1,500
16		Productos carbonatados	0	15	40	100	8,000
17		Requerimiento Mínimo			900	4,000	2,000
18		Requerimiento Máximo			-	-	6,000
19							
20		Restricciones					
21		Peso requerido en la mezcla	2000	=	2,000		
22		Req. mínimo de proteínas	2080000	>=	1800000		
23		Req. mínimo de vitaminas	8000000	>=	8000000		
24		Req. mínimo de calcio	4800000	>=	4000000		
25		Req. máximo de calcio	4800000	<=	12000000		
26							
27		Costo total de la mezcla	16000				
28		(Función objetivo)					

Figura 12

Fórmulas de las restricciones y la función objetivo

20		Fórmulas columna C			Columna E
21		=C14+C15+C16		=	=I3
22		=SUMAPRODUCTO(C14:C16;E14:E16)		>=	=I3*E17
23		=SUMAPRODUCTO(C14:C16;F14:F16)		>=	=I3*F17
24		=SUMAPRODUCTO(C14:C16;G14:G16)		>=	=I3*G17
25		=SUMAPRODUCTO(C14:C16;G14:G16)		<=	=I3*G18
26					
27		=SUMAPRODUCTO(C14:C16;D14:D16)			

Análisis de sensibilidad en Solver

Una vez encontrada la solución, como se muestra en la figura 10, si en el diálogo final del Solver se selecciona el informe "Sensibilidad" y se obtiene el informe de sensibilidad de los coeficientes de las variables de decisión en la función objetivo y de los lados derechos de las restricciones, como se muestra en la figura 13.

Estos reportes de sensibilidad son "estáticos", es decir, el análisis de sensibilidad está limitado a la variación de los parámetros del problema, uno a la vez, manteniendo todos los demás parámetros constantes.

Figura 13

Informe de sensibilidad del Solver.

Celdas de variables

Celda	Nombre	Final Valor	Reducido Coste	Objetivo Coeficiente	Permisible Aumentar	Permisible Reducir
D14	Harina de Pescado a usar, Kg	1200	0	10	1E+30	5
D15	Soya a usar, Kg	800	0	5	5	1E+30
D16	Productos carbonatados a usar, Kg	0	10.9	15	1E+30	10.9

Restricciones

Celda	Nombre	Final Valor	Sombra Precio	Restricción Lado derecho	Permisible Aumentar	Permisible Reducir
D21	Peso requerido en la mezcla a usar, Kg	2000	4	2000	6000	388.8888889
D22	Req. mínimo de proteínas a usar, Kg	2080000	0	1800000	280000	1E+30
D23	Req. mínimo de vitaminas a usar, Kg	8000000	0.001	8000000	4000000	2666666.667
D24	Req. mínimo de calcio a usar, Kg	4800000	0	4000000	800000	1E+30
D25	Req. máximo de calcio a usar, Kg	4800000	0	12000000	1E+30	7200000

A continuación, se describen los resultados del reporte de sensibilidad.

1. Reporte de "Celdas de variables"

   Este informe trata de las variables de decisión del modelo.

   Celda. Describe la dirección de las variables de decisión en la hoja de cálculo.

   Nombre. Es el texto que aparece a la izquierda de la celda de la variable de decisión.

   Final Valor. Es el valor final de la variable de decisión en la solución óptima.

   Reducido Coste. Es el valor del costo reducido de la variable, es decir, la mejora que debe tener el coeficiente de la variable de decisión en la función objetivo para formar parte de la solución (formar parte de la solución significa tener un valor mayor a cero en la solución óptima). Si el valor del costo reducido es cero, significa que la variable forma parte de la solución.

   Por ejemplo, en este caso, la variable Productos carbonatados, no forma parte de la solución y tiene un costo reducido de 10.9. Esto significa que el costo de los productos carbonatados debería mejorar en S/. 10.9, es decir costar S/. 15-S/. 10.9 = S/. 4.1/kg, para que los productos carbonatados formen parte de la solución.

Alternativamente, si el costo reducido no es cero, el costo reducido es el valor por el cual la función objetivo se deteriorará por el ingreso de una unidad de la variable en la solución. En este caso, si forzamos a que por ejemplo 1 kg de Productos carbonatados forme parte de la solución, la función objetivo crecerá en S/. 10.9 (se deteriora por que sube el costo).

Objetivo Coeficiente. Es el valor del coeficiente de la variable de decisión en la función objetivo.

Permisible Aumentar y Permisible Disminuir. Son los valores entre los cuales el coeficiente de la variable en la función objetivo puede variar sin que la solución cambie.

Nota sobre soluciones óptimas alternativas.

Algunas veces puede resultar que los valores de las columnas “Permisible Aumentar” y “Permisible Disminuir” de los coeficientes de las variables de decisión tienen un valor de cero. En este caso (pero en usencia de degeneración que se explica más abajo) estos son indicadores de la existencia de soluciones óptimas alternativas.

2. Reporte de “Restricciones”

Este reporte trata de las restricciones del modelo.

Celda. Describe la dirección de las restricciones en la hoja de cálculo.

Nombre. Es el texto que aparece a la izquierda de la celda de la variable de decisión.

Final Valor. Es el valor que toma el lado izquierdo de la restricción en la solución óptima.

Sombra Precio. Es el cambio en la función objetivo por el incremento (o decremento) de una unidad en el lado derecho de la restricción, siempre que estos cambios se produzcan dentro de los límites establecidos en Permisible Aumentar (o Permisible Reducir).

Por ejemplo, en la restricción del Peso requerido de la mezcla, el precio sombra es de S/. 4, y, si se quisiera obtener 100 kg de mezcla adicionales, el costo de la mezcla subiría en S/. 4 por cada Kg adicional, es decir, la función objetivo sería de S/. 16,000 (valor actual) más 100*4= 400, en total S/. 16,400. Este precio sombra de S/.4 seguiría siendo la tasa de cambio en la función objetivo hasta un incremento adicional de 6,000 kg (valor de Permisible Aumentar).

Si, por el contrario, se requiriesen solo 1,900 kg de mezcla, el costo de la mezcla bajaría de S/. 16,000 a S/. 15,600, (16,000-100*4). Esta disminución unitaria por kg seguiría siendo válida hasta 388.88 kg menos (valor de Permisible Reducir).

Si el precio sombra es cero, significa que la restricción no es confinante, es decir, el lado derecho y el lado izquierdo de la restricción no tienen valores iguales, y por lo tanto, hay holguras (como el caso de la restricción del máximo de calcio) o excedentes (como los casos de las restricciones del mínimo de proteínas y mínimo de calcio).

Restricción Lado Derecho. Es el valor original del lado derecho de la restricción.

Permisible Aumentar y Permisible Reducir. Son los valores máximo y mínimo que los lados derechos de las restricciones pueden variar, manteniendo constante el precio sombra de la restricción. Más allá de estos límites, el precio sombra cambiará.

Nota sobre soluciones degeneradas.

Esta explicación es válida para los casos en los que no existen soluciones degeneradas (que se reconocen porque algunos de los valores en las columnas "Permisible Aumentar" y "Permisible Reducir" tiene como valor cero). La explicación de la sensibilidad efectuada arriba se impacta en este caso de varias formas:

- No se puede asumir como cierta (puede haber casos en los que no se cumpla) la existencia de soluciones óptimas alternativas cuando las variables de decisión presentan valores cero en las columnas en las columnas "Permisible Aumentar" y "Permisible Reducir".
- Cuando la solución es degenerada, los costos reducidos de las variables de decisión pueden no ser únicos. Adicionalmente, en este caso, los coeficientes de las variables de decisión deben cambiar por lo menos (y posiblemente más) del valor de sus costos reducidos, antes que se produzca una variación en la solución óptima.
- Cuando la solución es degenerada, los precios sombra y sus rangos pueden ser interpretados de la forma usual, pero pueden ser no únicos, es decir, que pueden existir otros precios sobra y rangos aplicables al problema (aun si la solución óptima es única)

Solución de un caso de programación en enteros

Para ilustrar el uso del Solver con variables enteras consideramos el siguiente problema.

Modas SAC es una empresa exitosa de confecciones de vestir en las líneas de camisas, shorts, pantalones, faldas y casacas en el emporio comercial de Gamarra. Debido a su prestigio logra vender sin problemas todo lo que produce. No posee maquinarias de confección, pero las alquila por periodos definidos de acuerdo con el tipo de prendas a fabricar. No tiene limitaciones para el alquiler de máquinas debido al gran número de empresas que se dedican al alquiler de estas máquinas. Sin embargo, debido a lo competitivo del mercado de Gamarra, tiene limitaciones en la producción por las disponibilidades de mano de obra y las telas de confección de las prendas, las que están limitadas a un tope de 4000 horas hombre y 4500 metros cuadrados a la semana respectivamente. El gerente de comercialización de Modas cree que puede mejorar los ingresos de la compañía si pudiera hacer un plan de producción que le indicara la mejor mezcla de productos a fabricar, para lo cual se cuenta con la información en la tabla que sigue. Debemos aclarar que los alquiles son semanales. Por ejemplo, si se alquila la máquina para fabricar camisas, costará $1,500/semana y podrá producir hasta 2, 000 camisas y produce un margen de $15/unidad

Prenda	Alquiler de Equipo, US$	Capacidad de Producción, u	Labor hr/unidad	Tela m2/unidad	Margen US$/unidad
Camisas	1500	2000	2.0	3.0	15
Shorts	1200	4000	1.0	2.5	30
Pantalones	1600	666	6.0	4.0	40
Faldas	1500	1000	4.0	4.5	40
Casacas	1600	500	8.0	5.5	75
Disponible/semana			4000	4500	

¿Qué plan de producción semanal recomendaría usted?

Nuevamente, no vamos a explicar los detalles de la formulación de este problema de cargo fijo, más bien nos centraremos en la solución en Solver.

Como referencia, la siguiente sería la formulación algebraica en LINGO:

```
! Xj prenda tipo j a producir,
Yj variable (0,1), 1= se produce, 0=no se produce la prenda j;

Max = Margenu - costosf;
Margenu = 15*x1+30*x2+40*x3+40*x4+75*x5;
costosf = 1500*y1+1200*y2+1600*y3+1500*y4+1600*y5;

x1 <= 2000*y1;
x2<= 4000*y2;
x3 <= 666*y3;
x4 <= 1000*y4;
x5 <= 500*y5;
```

```
2*x1+1*x2+6*x3+4*x4+8*x5 <= 4000;
3*x1+2.5*x2+4*x3+4.5*x4+5.5*x5 <= 4500;
@Gin (x1);@Gin (x2);@Gin (x3);@Gin (x4);@Gin (x5);
@bin(y1);@bin(y2);@bin(y3);@bin(y4);@bin(y5);
end
```

Para la solución en Solver se considera la siguiente tabla:

Figura 14

Tabla de datos del problema Modas SAC y variables de decisión.

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2	Problema de Modas SAC						
3					Labor y materiales		
4		Prenda	Alquiler de	Capacidad de	Labor	Tela	Margen
5			Equipo, US$	producción, u	hrs/u	m2/u	US$/unidad
6		Camisas	1,500	2,000	2	3	15
7		Shorts	1,200	4,000	1	2.5	30
8		Pantalones	1,600	666	6	4	40
9		Faldas	1,500	1,000	4	4.5	40
10		Casacas	1,600	500	8	5.5	75
11		Disponible/semana			4000	4500	
12							
13							
14		Prenda	¿Se produce?	Unidades a		Capacidad	
15			1=si, 0=no	producir		utilizada	
16		Camisas			<=	0	=D6*C16
17		Shorts			<=	0	=D7*C17
18		Pantalones			<=	0	=D8*C18
19		Faldas			<=	0	=D9*C19
20		Casacas			<=	0	=D10*C20

La celda en amarillo intenso representará la variable binaria yj, que indica si la prenda se produce o no, mientras que la celda amarilla clara las variables xj representan las unidades a producir de la prenda j. Las celdas F16:F20 indican que la capacidad de producción estará disponible solamente si se paga el cargo fijo del alquiler. Luego, construimos las restricciones para los recursos mano de obra y tela y la función objetivo con las fórmulas que se muestran en la hoja.

Figura 15

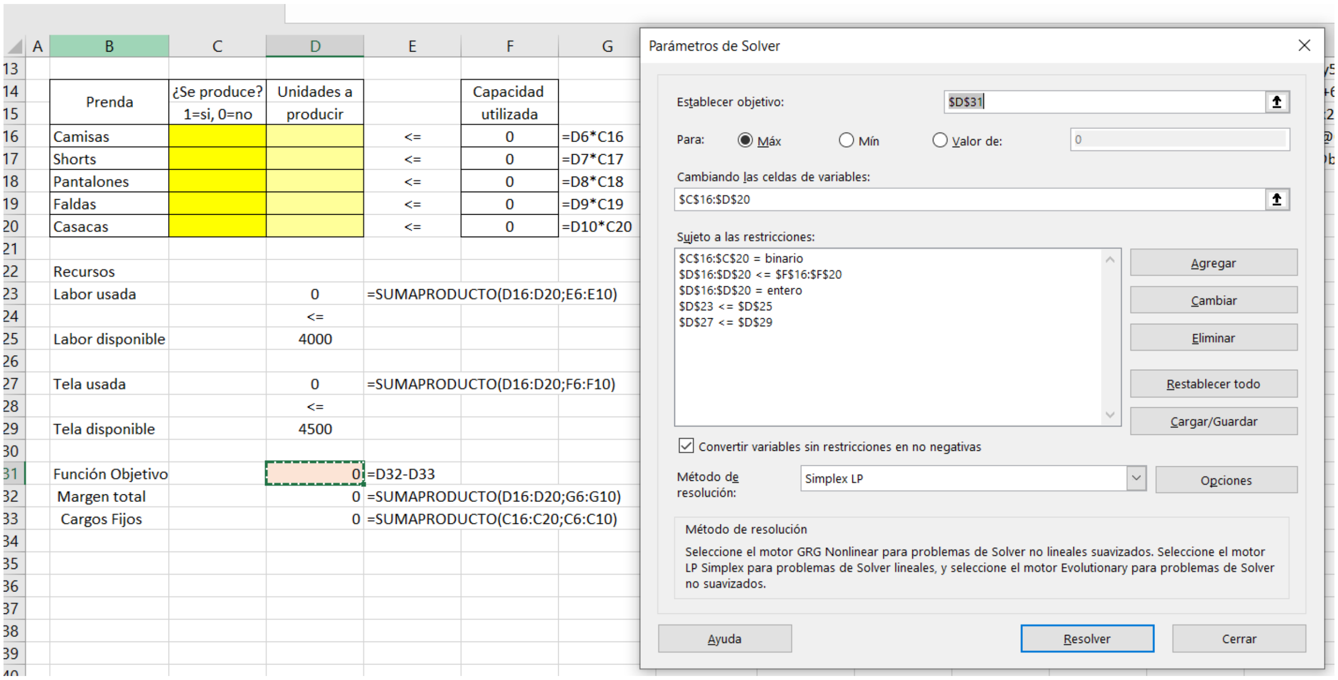
Función objetivo y restricciones del problema Modas SAC

	A	B	C	D	E	F	G
13							
14		Prenda	¿Se produce?	Unidades a		Capacidad	
15			1=si, 0=no	producir		utilizada	
16		Camisas			<=	0	=D6*C16
17		Shorts			<=	0	=D7*C17
18		Pantalones			<=	0	=D8*C18
19		Faldas			<=	0	=D9*C19
20		Casacas			<=	0	=D10*C20
21							
22		Recursos					
23		Labor usada		0	=SUMAPRODUCTO(D16:D20;E6:E10)		
24				<=			
25		Labor disponible		4000			
26							
27		Tela usada		0	=SUMAPRODUCTO(D16:D20;F6:F10)		
28				<=			
29		Tela disponible		4500			
30							
31		Función Objetivo		0	=D32-D33		
32		Margen total		0	=SUMAPRODUCTO(D16:D20;G6:G10)		
33		Cargos Fijos		0	=SUMAPRODUCTO(C16:C20;C6:C10)		

Luego se carga el Solver e se ingresa la función objetivo, tipo de optimización, maximización en este caso, las variables de decisión y las restricciones, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 16

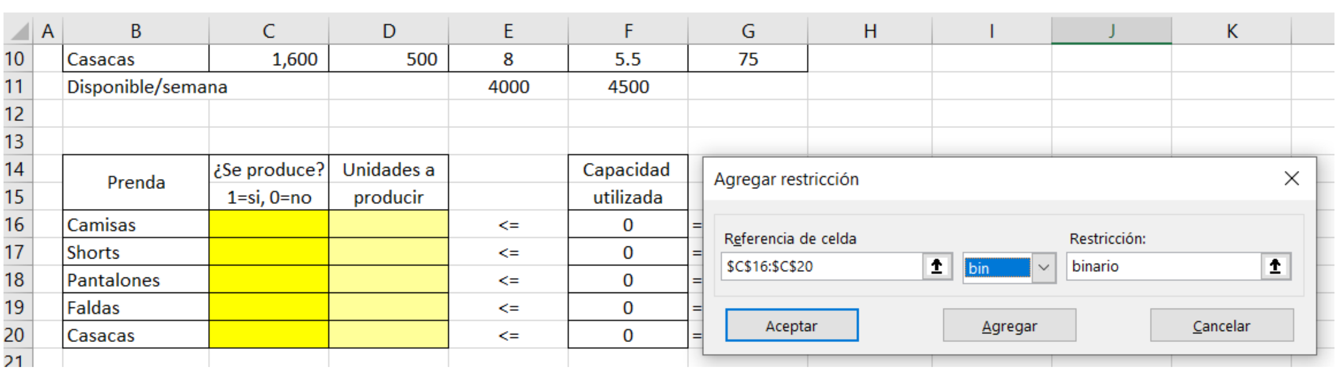
Ingreso de datos al Solver



Hasta este momento se ha ingresado lo función objetivo, las variables y restricciones, pero falta declarar que las variables yj y xj son binarias y enteras respectivamente. Para declarar como binarias a las variables yj, en la ventana de Solver se selecciona "Agregar" restricciones y se selecciona la dirección de las variables (C16:C:20) y en la hoja y en el centro de la ventana seleccionamos "bin", que indica que el rango de celdas es binario.

Figura 17

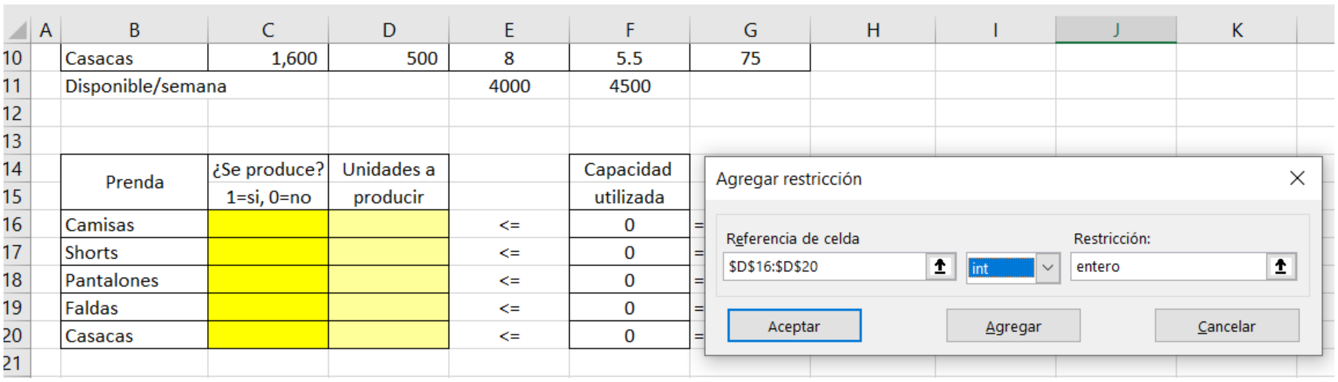
Declaración de variables como binarias.



En forma similar, se selecciona las celdas D16:D20 y las declaramos como “int”, enetras, para las variables xj.

Figura 18

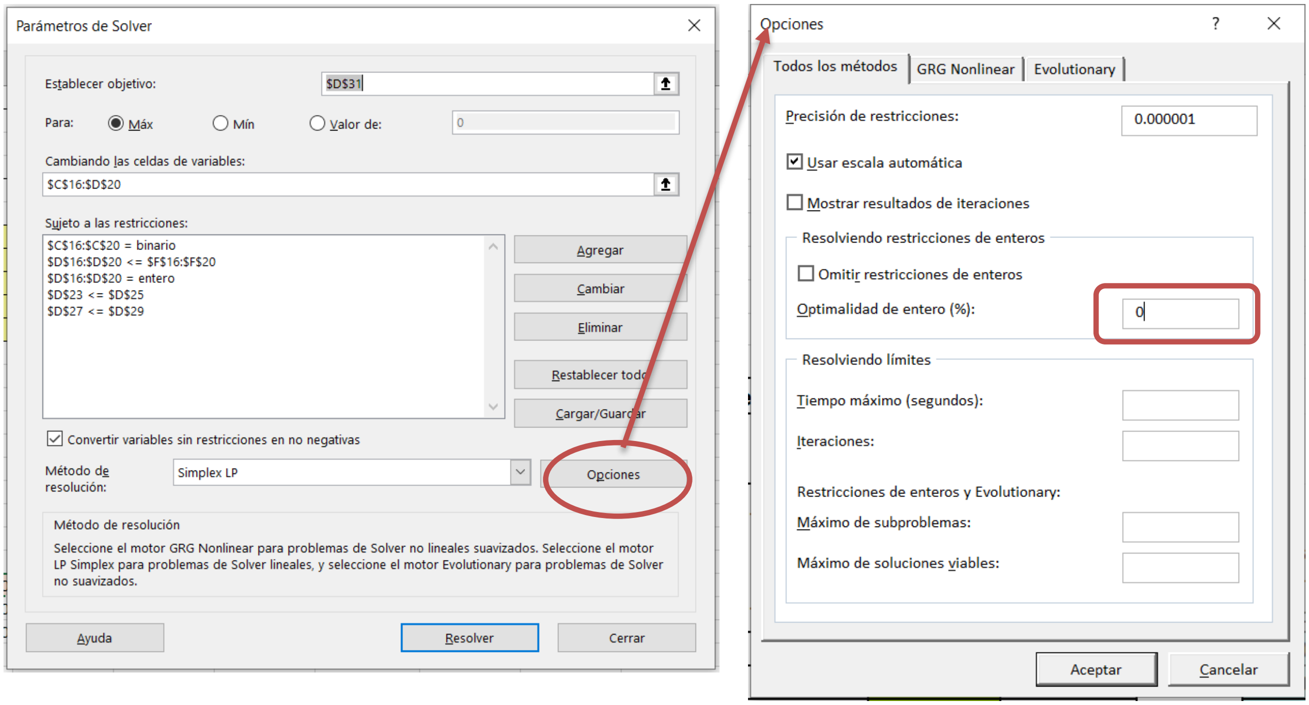
Declaración de variables como enteras.



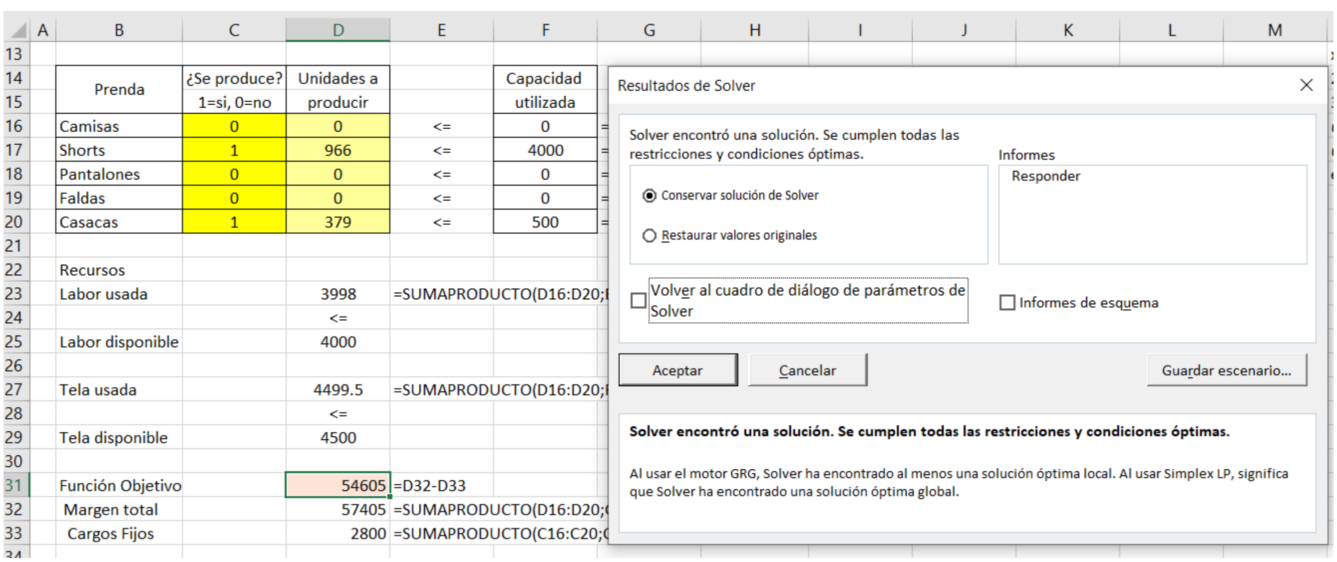
Seguidamente se acepta y ya estaría la formulación completa, con la especificación de los tipos de variables. Ahora es necesario que en la ventana del Solver, se selecciona en el botón de opciones y en el recuadro de “Optimalidad de entero (%)” se reemplaza el número que aparece allí (generalmente 1) y se reemplaza por cero. Esto es necesario porque el Solver utiliza algoritmos combinatorios para resolver los problemas en enteros y podría ser que para encontrar una solución se requiera más tiempo, por ese motivo, si la solución actual difiere como máximo en el porcentaje especificado el Solver se detendrá. Si se hace este parámetro como cero, el Solver tratará de llegar a la mejor solución en el tiempo especificado.

Figura 18

Establecimiento de las opciones para problemas en enteros



Al dar aceptar en el diálogo de Opciones se regresa al diálogo de Solver, dando nuevamente aceptar se encuentra la solución.



Descripción de las opciones de cálculo del Solver

- Método "Simplex LP"

  LP significa programación Lineal. Este método se usa para modelos con ecuaciones de primer orden. Las ecuaciones de primer orden son aquellas en las que las variables de decisión están elevadas a la primera potencia y su gráfico es una línea recta. El Método Simplex LP producirá siempre soluciones óptimas globales para los problemas de optimización que puede resolver.

- Método "GRG Nonlinear"

  Se debe seleccionar este método cuando las ecuaciones formadas con las variables de decisión son no lineales pero continuas. Un problema de optimización no lineal (NLP, smooth nonlinear programming) es uno en el que la función objetivo, o al menos una de las restricciones, es una función no lineal diferenciable de las variables de decisión. Por ejemplo:

  4 X12 +3 X23 + log X3

  Es una función no lineal diferenciable, donde X1, X2 y X3 son variables de decisión. Las funciones no lineales, a diferencia de las lineales, involucran variables que están elevadas a una potencia, pueden estar multiplicadas o divididas por otras variables. Adicionalmente pueden usar funciones trascendentales como la logarítmica, la exponencial, seno y coseno. Los problemas no lineales y sus métodos de solución requieren que las funciones no lineales sean continuas y que generalmente sean diferenciables con respecto a cada variable de decisión, es decir, que las gradientes de la función sean continuas.

  Una función es continua si no tiene quiebres cuando es graficada. Por ejemplo, la función del Excel =IF(C1>40, D1, 5*D1) es discontinua, asumiendo que C1 es una variable de decisión, porque su valor "salta" de D1 a 5*D1. De otro lado, la función Excel ABS(C1) es continua pero no diferenciable, su gráfico es una "V" continua, pero su derivada es discontinua, ya que salta de -1 a +1 en C1 = 0.

- Método Evolutivo (Evolutionary)

  Este método se debe usar si cualquiera de las funciones del modelo es discontinua o no diferenciable. Se llama método evolutivo por que utiliza algoritmos evolutivos.

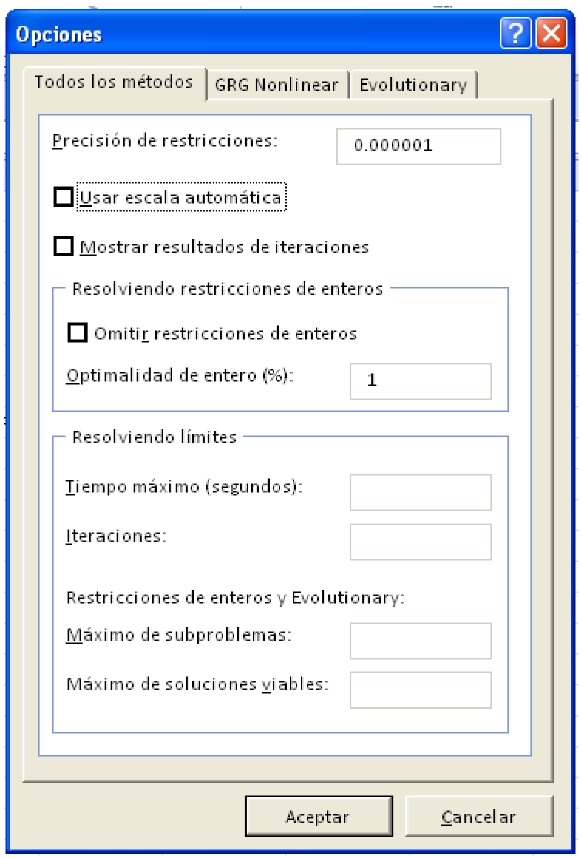
  Los problemas no diferenciables o discontinuos son los más complejos de resolver y le pueden tomar mucho tiempo al Solver Excel. Adicionalmente, el método evolutivo solo puede encontrar "buenas" soluciones y no soluciones locales o globales.

Las funciones de Excel que son no diferenciables son MIN, MAX y ABS. Las funciones discontinuas del Excel son: INDICE, CONSULTAH, CONSULTAV, BUSCAR, ENTERO, REDONDEAR, CONTAR, BDMAX, BDMIN, SI, ELEGIR, NO, Y, O, MAYOR.O.IGUAL. Si cualquiera de estas funciones forma parte del modelo en Excel se debe usar el Método Evolutivo.

Establecimiento de Opciones del Solver

A continuación, se muestra las opciones generales para todos los métodos antes de ejecutar el Solver para la mayoría de los problemas. Esta ventana aparece cuando seleccionamos el botón de "Opciones" en el diálogo Solver.

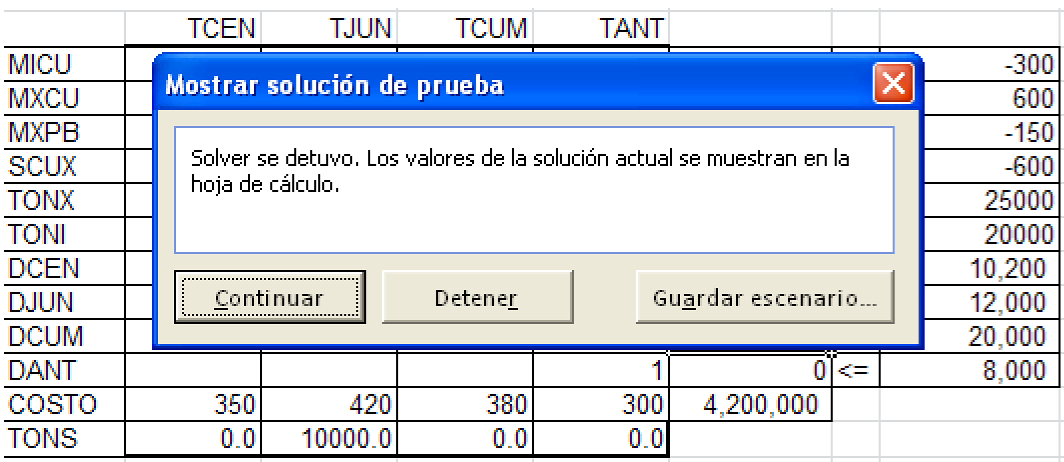
Establecimiento de Opciones – Todos los Métodos



Precisión de restricciones. Este valor establece la máxima diferencia entre la celda restringida y el valor real de la restricción. Se considera que la restricción es satisfecha si la diferencia entre ambos valores es menor o igual al valor considerado (0.000001 en el caso mostrado).

Usar escala automática. Esta opción hace que el Solver re-escale las variables, restricciones y la función objetivo. Esto es necesario si en el problema existen parámetros de entrada que tienen diferencias de magnitud importantes entre sus valores (por ejemplo, existen valores pequeños como 0.0001 y a la vez grandes como millones). Esto hará que en los cálculos se pierda precisión y se produzcan errores inesperados o condiciones para que el algoritmo se detenga. Se considera una buena práctica tener activada siempre esta opción.

Mostrar resultados de iteraciones. Esta opción hará que el Solver se detenga después de cada iteración mostrando los resultados alcanzados en esa iteración. Generalmente no se solicita esta opción a no ser que se tenga alguna razón particular para hacerlo. A continuación, se muestra el diálogo después de cada parada en un modelo de mezclas.



Omitir restricciones de enteros. Esta opción se usa para "relajar" el problema lineal en enteros, es decir omitir todas las declaraciones en enteros para las variables de decisión. En general es una buena práctica correr un problema en enteros primero como un problema relajado, ya que, si la solución resulta en forma natural en enteros, tendremos el beneficio de los reportes de sensibilidad.

Optimalidad de entero (%). Define la máxima diferencia en % entre el valor de la función objetivo de la mejor solución del problema considerando las restricciones en enteros y el problema relajado. El valor por defecto es 1%. Seleccionando 0% se garantiza obtener la mejor solución, pero puede tomar mucho tiempo.

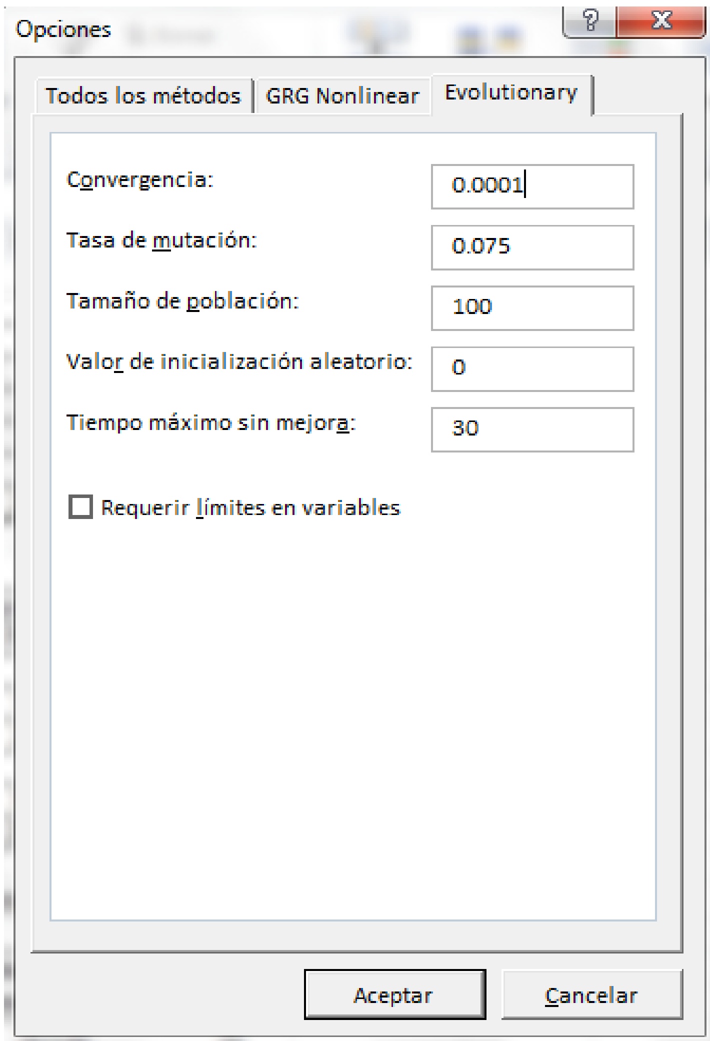
Límites para la solución (mostrado como "Resolviendo Límites")

Tiempo máximo (segundos). El tiempo máximo de ejecución de un problema permitido al Solver. Sin embargo, presionando la tecla ESC se puede detener la ejecución en cualquier momento. Si hacemos esto el Solver preguntará si queremos detener la ejecución definitivamente o continuar.

Iteraciones. El máximo número de iteraciones (ejecuciones de prueba) que se le permite ejecutar la Solver.

Restricciones de enteros y Evolutionary. Esta opción solo aplica si se utiliza el Método Evolutivo o si se usa cualquier tipo de restricciones en enteros (entero, binario o “todos diferentes”).
Máximo de subproblemas. El número máximo de subproblemas permitido al Método evolutivo para evaluar.
Máximo de soluciones viables. El número máximo de soluciones factibles de generar permitidas al Solver.

Establecimiento de opciones para el Método Evolutivo
A continuación, se explicará las opciones para resolver problemas con el Método Evolutivo.



Convergencia. La convergencia permite especificar qué tan cerca se desea que la solución final del Solver esté de la solución óptima. El valor de la convergencia establece la máxima diferencia en % que el 99% de las últimas soluciones encontradas tienen entre ellas, antes de que el Solver presente el siguiente mensaje: “Solver no puede mejorar la solución actual. Se cumplen todas las restricciones" y presente su solución final. A medida que el valor de la convergencia es más pequeño se requerirán más iteraciones para alcanzar este valor, pero la solución proporcionada por el Solver estará más cercana a la solución óptima.

Tasa de Mutación. Es la tasa o frecuencia de cambio, a la cual "mutarán" (es decir cambiarán) las soluciones (cada solución representa un individuo, y la generación es el conjunto de soluciones consideradas en una iteración) que mantiene el Solver en el espacio de soluciones, a fin de incrementar la probabilidad de no quedarse atrapado en un óptimo local y a la vez explorara otras regiones que pudieran aportar mejores soluciones. La frecuencia de mutación es un número entre 0 y 1.

Tamaño de población. Este valor establece cuántos puntos muestreados del espacio de soluciones serán mantenidos como soluciones candidatas en todo momento para cada variable de decisión. Este valor debe ser un número entre 10 y 200.

Valor de inicialización aleatorio. El algoritmo evolutivo utiliza un generador de números aleatorios para diferentes elecciones aleatorias, que inicia una serie de números aleatorios a partir de un número "semilla". Si se ingresa un número o semilla, el Solver realizará las mismas elecciones cada vez que se ejecute. Si se deja en blanco o cero, el Solver usará una semilla diferente para generar números aleatorios cada vez que se ejecute, lo cual puede llevar a una solución diferente que puede ser mejor o peor que la anterior.

Tiempo máximo sin mejora. Este es el tiempo en segundos permitido para que el Solver continúe trabajando sin lograr una mejora significativa en la solución final. Después de transcurrido este límite de tiempo, el Solver emitirá el mensaje" Solver no puede mejorar la solución actual. Se cumplen todas las restricciones".

Requerir límites en variables. Esto indicará que el Solver trabajará solo si las variables de decisión tienen límites superiores e inferiores establecidos. En general, el algoritmo evolutivo será más eficiente si las variables de decisión tienen límites más estrechos.

Referencias

Anderson et al. (2016). *Métodos cuantitativos para los negocios* (13° ed.). Cengage Learning.

Baker, K., (2011). *Optimization Modeling with Spreadsheets* (2° e.). John Wiley & Sons.

Harmon, M. (2011). *Step-By-Step Optimization with Excel Solver*. http://excelmasterseries.com

Filstra, D., Lasdon, L., & Watson, J. (1988). Design and use of Microsoft Excel Solver, *Interfaces*, 28(5), 29-55.

Frontline Systems. (2020). Optimization Tutorial. http://www.solver.com/optimization-tutorial.

Ragsdale, C. (2015) *Spreadsheet Modeling & Decision Analysis, A practical Introduction to Business Analytics* (7° ed.). Cengage Learning.