

## 7. MODELO FINAL

### 7.1. INTRODUCCIÓN

Se expone en este apartado el modelo final generado mediante el programa *EXCEL 2003*. Se trata de una serie de hojas de cálculo donde, tras definir los condicionantes de la obra de estudio, utiliza las relaciones extraídas de rendimientos así como los costes definidos anteriormente para dar como resultado final el coste y plazo en forma de distribución normal. Veamos paso a paso en que consiste exactamente el modelo. Aquí se presentarán una serie de tablas básicas del modelo, recortadas en ocasiones para evitar largas listas de iteraciones o, como en el caso de los datos de costes, debido a su gran volumen. Podrá verse en el Anejo 5 “Hoja de cálculo modelo” de forma completa y clara cada una de las hojas que componen el modelo y, como es lógico, estudiarlo más de cerca en la copia digital que se entrega.

### 7.2. ZONIFICACIÓN

Se muestra aquí la hoja de inicio, en ella se deben introducir todos los parámetros que se tendrán en cuenta en el modelo y que ya han sido concretados anteriormente. Los datos a introducir son aquellos que se muestran en color azul y se permite dividir la traza hasta un máximo de 4 zonas. Solo es posible escoger un solo tipo de tuneladora y escudo para todo el túnel y trabajar en un solo frente. A parte de las variables necesarias para resolver el problema satisfactoriamente, tenemos otras 4 que ayudaran a acotar más si cabe el resultado final. Estas son:

- Pérdida de máquina: En el caso de que no se pierda la tuneladora en el transcurso de la obra, podemos recuperar parte de su coste según los datos aportados por las casas de tuneladoras.
- Factor de rendimiento: Tal como se expuso en el apartado 5.4 “*Desarrollo para el Caso de Estudio*” en caso de tener factores tal como un elevado porcentaje de curvas en la traza que puedan afectar el rendimiento final, se permite mediante esta opción aplicar el porcentaje estimado de reducción a la producción resultante dada por el modelo.
- Distancia a origen de tuneladora: Con este parámetro se definirá exactamente el coste del transporte de la máquina a la obra y se ha de introducir su valor en kilómetros.
- Disponibilidad de fábrica de dovelas: Se considera necesario saber si a una distancia a la que resulte rentable, por los costes de transporte, existe ya una fábrica de dovelas que pueda servir a la obra o si por el contrario ésta deberá ser construida por la contrata. Este factor tendrá su efecto en los costes asociados al sostenimiento.

En función de la cobertura introducida y del diámetro de la tuneladora se presenta también como resultado si esa cobertura es suficiente o no. Asimismo se muestra otro resultado derivado de los datos como es el diámetro interno útil considerando el efecto tanto del gap como del sostenimiento.

DATOS ZONIFICACION				
	ZONA 1		ZONA 2	
PROB. PRODUCCION	0,8	0,4	0,8	0,2
ZONA	URBANO	URBANO	URBANO	URBANO
DIAMETRO	6,9	6,9	6,9	6,9
LONGITUD TOTAL	4000	4000	500	500
COBERTURA	80	80	120	120
MATERIAL	SUELO	MIXTO	SUELO	MIXTO
AGUA	SI	SI	SI	SI
TUNELADORA	EPB	EPB	EPB	EPB
ESCUDO	SIMPLE	SIMPLE	SIMPLE	SIMPLE
	ZONA 3		ZONA 4	
PROB. PRODUCCION	0,9	0,1	0,25	0,75
ZONA	NO URBANO	NO URBANO	URBANO	URBANO
DIAMETRO	6,9	6,9	6,9	6,9
LONGITUD	1000	1000	500	500
COBERTURA	50	50	60	60
MATERIAL	SUELO	MIXTO	SUELO	MIXTO
AGUA	SI	SI	SI	SI
TUNELADORA	EPB	EPB	EPB	EPB
ESCUDO	SIMPLE	SIMPLE	SIMPLE	SIMPLE
PERDIDA MAQUINA	NO			
FACTOR RENDIMIENTO	100%			
DIST. ORIGEN TUNELADORA	3000			
DISPONIBILIDAD FABRICA				
DOVELAS	NO			
LONGITUD TOTAL				6000
GAP				0,15
DIAMETRO INTERNO UTIL				6,01
COBERTURA SUFICIENTE	ZONA 1 SI	ZONA 2 SI	ZONA 3 SI	ZONA 4 SI

Tabla 3.- Datos Zonificación

Como resultado directo de los datos introducidos en la hoja anterior se presenta a continuación una tabla que muestra, de forma zonificada, los avances máximo, mínimo y medio en forma de producciones y rendimientos [metros/mes] respectivamente. De ellos se extrae, según las probabilidades asociadas a cada subdivisión de zona, la esperanza de la producción así como los tiempos medios de ejecución y desviaciones.

AVANCES / PRODUCCION				
	ZONA 1		ZONA 2	
AVANCE MAX	0,002374244 421	0,002338173 428	0,002374244 421	0,002338173 428
AVANCE MIN	0,004167918 240	0,00405802 246	0,004167918 240	0,00405802 246
AVANCE MEDIO	0,003025194 331	0,002968875 337	0,003025194 331	0,002968875 337
MEDIA	0,00318912 331	0,00312102 337	0,00318912 331	0,003121022 337
DESVIACION T	0,27532933 3,63	0,28728244 3,48	2,20263483 0,45	2,29826952 0,44
ESPERANZA PRODUCCION	0,00300159343 333		0,00301334758 332	
TIEMPO ZONA	12,01		1,51	
DESVIACION ZONA	3,57		0,45	
	ZONA 3		ZONA 4	
AVANCE MAX	0,001845259 542	0,002225782 449	0,002374244 421	0,002338173 428
AVANCE MIN	0,002772813 381	0,003730987 268	0,004167918 240	0,00405802 246
AVANCE MEDIO	0,002215821 451	0,002788195 369	0,003025194 331	0,002968875 337
MEDIA	0,00227790 451	0,002914981 369	0,00318912 331	0,003121022 337
DESVIACION T	2,14232252 0,47	1,31478854 0,78	2,20263483 0,45	2,29826952 0,44
ESPERANZA PRODUCCION	0,00226226174 442		0,00298124284 335	
TIEMPO ZONA	2,26		1,49	
DESVIACION ZONA	0,50		0,44	

Tabla 4.- Resultados Avances-Producción

En la hoja que se muestra a continuación se presentan más resultados que se derivan de los datos introducidos al modelo y que serán necesarios para el cálculo del coste y plazo. Éstos provienen tanto de relaciones ya tratadas en el apartado 4.4 “Análisis Parámetros Tuneladora” como de las hojas anteriores y son la potencia instalada [kW-h], el peso de la tuneladora [Tn] así como el grosor del sostenimiento [m]. Todos ellos, como viene siendo habitual se presentan en forma de media y desviación estándar.

Otros resultados se muestran aquí tal como la superficie de excavación [m<sup>2</sup>], el volumen total de tierras a excavar [m<sup>3</sup>] o el volumen total de dovelas [m<sup>3</sup>], que se encuentran a partir de relaciones geométricas básicas función del diámetro.

Para el cálculo de costes, no bastará con el cálculo de volumen de tierras a excavar, sino que será necesario saber qué volumen llega al vertedero y para ello será imprescindible el cálculo del factor de esponjamiento. Esa es la finalidad de la tabla inferior de esta hoja y como puede verse considera el factor de cada zona aplicando las probabilidades de cada subdivisión de zona para realizar finalmente una ponderación por las longitudes de zona. Los valores que se han tomado para cada tipo de terreno son:

- Suelo: Factor de esponjamiento 15 %
- Mixto: Factor de esponjamiento 20 %
- Roca: Factor de esponjamiento 25 %

Se presentan aquí también algunos datos derivados de las hojas anteriores como el tiempo total esperado y su desviación, como suma de normales de los tiempos de cada zona. Junto a estos datos pueden verse las casillas del tiempo total y desviación al que, en el caso de que así fuese necesario, se haya aplicado un factor de reducción de la producción (FR), factor que puede modificarse en la primera hoja del modelo y que puede consultarse en la tabla 3.

POTENCIA INSTALADA	1873
DESVIACION POTENCIA	409

PESO TUNELADORA	493
DESVIACION PESO	170

MATERIAL SOSTENIMIENTO	
GRUESO SOSTENIMIENTO	0,30
DESVIACION	0,03
VOLUMEN DOVELAS	5,85
VOLUMEN DESVIACION	0,20

Volumen Total Dovelas	35093,69
Desviación Volumen	180

TIEMPOS	
TIEMPO TOTAL ESPERADO	17,27
DESVIACION	3,86
TIEMPO TOTAL MEDIO · FR	17,27
DESVIACION · FR	3,86

VOLUMENES TIERRAS	
SUPERFICIE EXCAVACION	37,39
VOLUMEN EXCAVACION	224356,84
F. ESPONJAMIENTO	17%
VOLUMEN VERTEDERO	262078,83

CALCULO FACTOR ESPONJAMIENTO			RESULTADO
Z1	P1	0,15	0,17
	P2	0,2	
Z2	P1	0,15	0,18
	P2	0,2	
Z3	P1	0,15	0,155
	P2	0,2	
Z4	P1	0,15	0,1875
	P2	0,2	

Tabla 5.- Resultados Plazo Final – Parámetros Tuneladora/Sostenimiento

### 7.3. DATOS COSTES

Pasamos ahora a ver el formato que se la ha dado al tratamiento de los datos de costes.

COSTES PARA AÑO 2007		AÑO ACTUAL 2007		INFLACION MEDIA 4.00%			
<b>DEPENDIENTE TIEMPO</b>		<b>INDEPENDIENTE TIEMPO</b>		<b>FIJOS</b>		<b>TUNELADORA + MAQUINARIA</b>	
<b>OFICINA/INSTALACIONES</b>		<b>SOSTENIMIENTO SIN FABRICA</b>		<b>TRANSPORTE MAQUINARIA</b>		<b>COSTE MAQUINA</b>	
MAX	300.000,00 €	MAX	637,97 €	MAX	0,66 €	DES. COSTE MAQUINA	1.386.003,00 €
MIN	120.000,00 €	MIN	487,87 €	MIN	0,42 €		
MED	250.000,00 €	MED	582,97 €	MED	0,60 €		
MEDIA	223.333,33 €	MEDIA	582,97 €	MEDIA	0,62 €		
DESV	37.932,869 €	DESV	30,619 €	DESV	0,048 €		
<b>PERSONAL</b>		<b>SOSTENIMIENTO CON FABRICA</b>		<b>MONTAJE</b>		<b>MAQUINARIA</b>	
MAX	580.000,00 €	MAX	785,00 €	MONTAJE	761.252,30 €	MAX	7.370.492,75 €
MIN	390.000,00 €	MIN	615,00 €	DESVIACION MONT	128.857,30 €	MIN	6.707.248,38 €
MED	520.000,00 €	MED	700,00 €			MED	6.497.101,45 €
MEDIA	498.868,67 €	MEDIA	700,00 €			MEDIA	6.258.280,19 €
DESV	39.661,258 €	DESV	34,701 €			DESV	186.105,482 €
<b>SEGURO</b>		<b>FABRICA NO</b>		<b>MEJORAS</b>		TBM SIN € -	
MAX	50.084,34 €	MEDIA	562,97 €	MAX	2.167.306,72 €	TBM SIMPLE	€ -
MIN	15.026,30 €	DESV	30,62 €	MIN	1.548.076,23 €	TBM DOBLE	€ -
MED	25.042,17 €			MED	1.857.691,47 €		€ -
MEDIA	30.050,61 €			MEDIA	1.857.691,47 €		
DESV	7.372,215 €			DESV	126.389,895 €		
<b>CONSUMOS</b>		<b>TRATAMIENTOS</b>		<b>IMPLANTACION Y RETIRADA</b>			
MAX	48,00 €	MAX	36,64 €	MAX	3.963.000,00 €		
MIN	24,00 €	MIN	34,64 €	MIN	2.859.000,00 €		
MED	33,00 €	MED	36,64 €	MED	3.300.000,00 €		
MEDIA	35,00 €	MEDIA	36,64 €	MEDIA	3.307.333,33 €		
DESV	4,950 €	DESV	0,516 €	DESV	143.726,786 €		
<b>PENALIZACION RETRASO</b>		<b>INSTALACIONES AUXILIARES</b>					
MESES SIN PENALIZACION	0,00 €	MAX	290,00 €				
TIEMPO REFERENCIA	0	MIN	245,00 €				
		MED	265,00 €				
		MEDIA	266,67 €				
		DESV	9,204 €				
<b>TOTAL MES</b>		<b>VERTEDERO TIERRAS</b>					
TOTAL MES	808.596,69 €	COSTE CINTA	920.260,00 €				
DESVIACION	55.982,30 €	COSTE TRANSPORTE CINTA	5,34 €				
		INCLUIDA AMORTIZACION	6,21 €				
		COSTE VERTEDERO	6,21 €				
		MAX	12,30 €				
		MIN	10,80 €				
		MED	11,55 €				
		MEDIA	11,55 €				
		DESV	0,306 €				

Tabla 6.- Parte de Tabla de Datos de Coste

Ya que los costes se han dividido en 4 categorías, aquí se presentan 4 columnas correspondientes a cada una de ellas. En éstas se sigue un mismo patrón, cuadro con título de la partida, coste máximo, mínimo y medio que permitirán, mediante las ya expuestas ecuaciones de media y desviación de distribución triangular, calcular estos valores.

En cuanto a los costes dependientes del tiempo [€/mes], se incluye una singularidad. En el caso de que el contrato de la obra contenga algún tipo de penalización [€/mes] por retraso, podrá incluirse aquí, nuevamente las casillas a cumplimentar se presentan de color azul. La penalización puede definirse a partir del tiempo esperado de ejecución de la obra (Tiempo referencia) así como dando un margen de tiempo extra antes de empezar a penalizar (meses sin penalización). Existe en esta categoría de costes otro aspecto destacable y distintivo del resto. Puede verse al final de la columna la suma total del coste mensual y su desviación. En cuanto a los consumos decir que el coste presentado está referido a la potencia unidad.

De la categoría de costes denominada "Independientes del tiempo" la primera observación a realizar es que está cortada, puede verse completa en el anejo 5. Destacamos asimismo que las unidades empleadas son [€/m<sup>3</sup>] a excepción de la partida *Tratamientos* que está definida en función del diámetro [€/m<sup>4</sup>] y de las *Instalaciones* que se define según la longitud [€/m].

De los costes fijos [€] el único comentario destacable hace referencia al coste de transporte, que al estar en función tanto del peso como de la distancia a origen de la tuneladora, las unidades en que se presenta son [€/ tn·km].

Finalmente, ya que las obras objeto de estudio son inevitablemente de media o larga duración, y puesto que de la fase de estudio a la fase de construcción pueden pasar años, se ha introducido la opción de modificar los costes de la tabla en base a la inflación media anual. Introduciendo el año en que está previsto el inicio de la obra así como la inflación media estimada para ese tiempo se actualizarán los datos de costes para esa fecha.

### 7.4. MEDIA Y DESVIACIÓN DEL COSTE PARA LA ESPERANZA DEL TIEMPO

En este apartado se muestra una tabla que, tanto por zonas, categorías así como de forma global, presenta por partidas y según las condiciones definidas anteriormente los costes asociados para el tiempo esperado de ejecución.

Se trata de una hoja útil para el estudio de costes puesto que permite ver de forma desglosada que magnitudes de coste alcanza cada uno de los aspectos que queramos comparar.

Será esta también la base de la simulación de Monte Carlo ya que, al tener aquí calculados los costes independientes del tiempo, fijos y por maquinaria en la forma de normal necesaria para el modelo, valdrán estos aplicando un tiempo aleatorio al coste mensual dependiente del tiempo para el cálculo de cada una de las iteraciones que compondrán el resultado final del modelo.

Como puede observarse al final de la tabla se muestra asimismo el coste de excavación y sostenimiento por metro lineal así como por metro cúbico. Estos son unos datos útiles de cara a presentar los resultados finales a la administración.

COSTES NORMALES PARA E(T)											
DEPENDIENTE DEL TIEMPO	ZONA 1		ZONA 2		ZONA 3		ZONA 4		TOTAL MEDIAS	TOTAL DESVIACION	
	MEDIA	DESVIACION	MEDIA	DESVIACION	MEDIA	DESVIACION	MEDIA	DESVIACION			
OPICINA / INSTALACIONES	2.691.423,46 €	456.434,04 €	336.490,48 €	57.152,19 €	506.238,46 €	86.813,67 €	332.905,46 €	56.543,28 €	3.896.067,84 €	470.369,71 €	
PERSONAL	5.963.165,61 €	476.267,82 €	748.314,64 €	59.741,51 €	1.123.590,00 €	89.701,52 €	740.341,87 €	59.105,01 €	8.575.412,22 €	481.690,16 €	
SEGURO	360.798,79 €	88.513,57 €	46.276,46 €	11.107,52 €	67.982,33 €	16.677,88 €	44.794,08 €	10.989,18 €	518.951,66 €	91.416,32 €	
COSTES ENERGÉTICOS	702.960,20 €	99.412,17 €	88.212,87 €	12.475,18 €	132.461,09 €	18.731,41 €	87.273,03 €	12.342,27 €	1.010.897,19 €	102.672,33 €	
COSTES PENALIZACION	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00 €	-	
									13.961.208,52 €	694.187,00 €	
total											
INDEPENDIENTES DEL TIEMPO	ZONA 1		ZONA 2		ZONA 3		ZONA 4		TOTAL MEDIAS	TOTAL DESVIACION	
	MEDIA	DESVIACION	MEDIA	DESVIACION	MEDIA	DESVIACION	MEDIA	DESVIACION			
SOSTENIMIENTO	13.224.314,48 €	24.135,72 €	1.653.039,31 €	3.017,47 €	3.306.078,62 €	6.034,93 €	1.653.039,31 €	3.017,47 €	19.836.471,72 €	25.245,92 €	
INYECCION GAP	1.019.543,22 €	40.668,03 €	127.465,28 €	5.083,50 €	254.910,56 €	10.167,01 €	127.465,28 €	5.083,50 €	1.525.463,33 €	42.831,84 €	
TRATAMIENTOS TERRENO	1.011.264,00 €	22.535,31 €	126.408,00 €	2.816,91 €	252.816,00 €	5.633,83 €	126.408,00 €	2.816,91 €	1.516.896,00 €	23.567,99 €	
INSTALACIONES	1.066.666,67 €	36.817,87 €	133.333,33 €	4.802,23 €	266.666,67 €	9.204,47 €	133.333,33 €	4.802,23 €	1.600.000,00 €	38.905,05 €	
VERTEDERO TIERRAS	2.034.433,87 €	53.496,21 €	254.304,33 €	6.697,03 €	506.606,47 €	13.374,05 €	254.304,33 €	6.697,03 €	3.051.650,90 €	56.547,69 €	
MANTENIMIENTO	483.513,63 €	47.423,79 €	60.451,70 €	9.329,72 €	100.503,41 €	11.857,44 €	60.451,70 €	9.329,72 €	725.420,45 €	48.603,35 €	
CONSUMO PICAS / CIRCOIS	3.213.654,15 €	106.395,81 €	276.705,77 €	13.373,70 €	553.413,54 €	26.747,40 €	276.705,77 €	13.373,70 €	3.320.481,22 €	111.892,42 €	
									31.660.393,52 €	444.173,46 €	
total											

FIJOS	LONGITUD TOTAL	
	MEDIA	DESVIACION
TRANSPORTE MAQUINARIA	774.678,96 €	70.552,55 €
MONTEJE MAQUINARIA	757.252,30 €	126.957,30 €
MEJORAS ORGANIZACION	1.836.733,63 €	134.306,95 €
IMPLANTACION Y RETIRADA	3.307.333,33 €	143.725,75 €
total	6.668.898,23 €	340.500,99 €

TUNELADORA X ZONA	6.860.832,22 €	924.002,00 €	732.604,03 €	115.600,25 €	1.466.208,05 €	231.000,50 €	732.604,03 €	115.600,25 €	8.791.248,32 €	886.344,42 €	
MAQUINARIA AUXILIAR	4.672.186,80 €	124.070,32 €	571.523,36 €	15.608,79 €	1.143.046,70 €	31.017,59 €	571.523,36 €	15.608,79 €	6.858.280,19 €	129.755,95 €	
									15.649.528,52 €	975.018,99 €	
total											

TOTAL E (COSTES NORMALES)	67.860.019,18 €	DESVIACION	1.229.300,79 €
Por reventa de máquina	1.564.952,85 €		

PARA E(T)	
€/ ml	€/ m3
11.310,00 €	382,46 €

Tabla 7.- Media y desviación del coste para la esperanza del tiempo tramificado.

Con los resultados ya disponibles en forma numérica, tanto del coste, para la esperanza del tiempo de ejecución, como del plazo, definidos ambos como normal con su media y desviación estándar podemos ya presentar estos resultados gráficamente. Puede verse a continuación la hoja de la página de cálculo en que se lleva a cabo este objetivo en forma de dos gráficas.

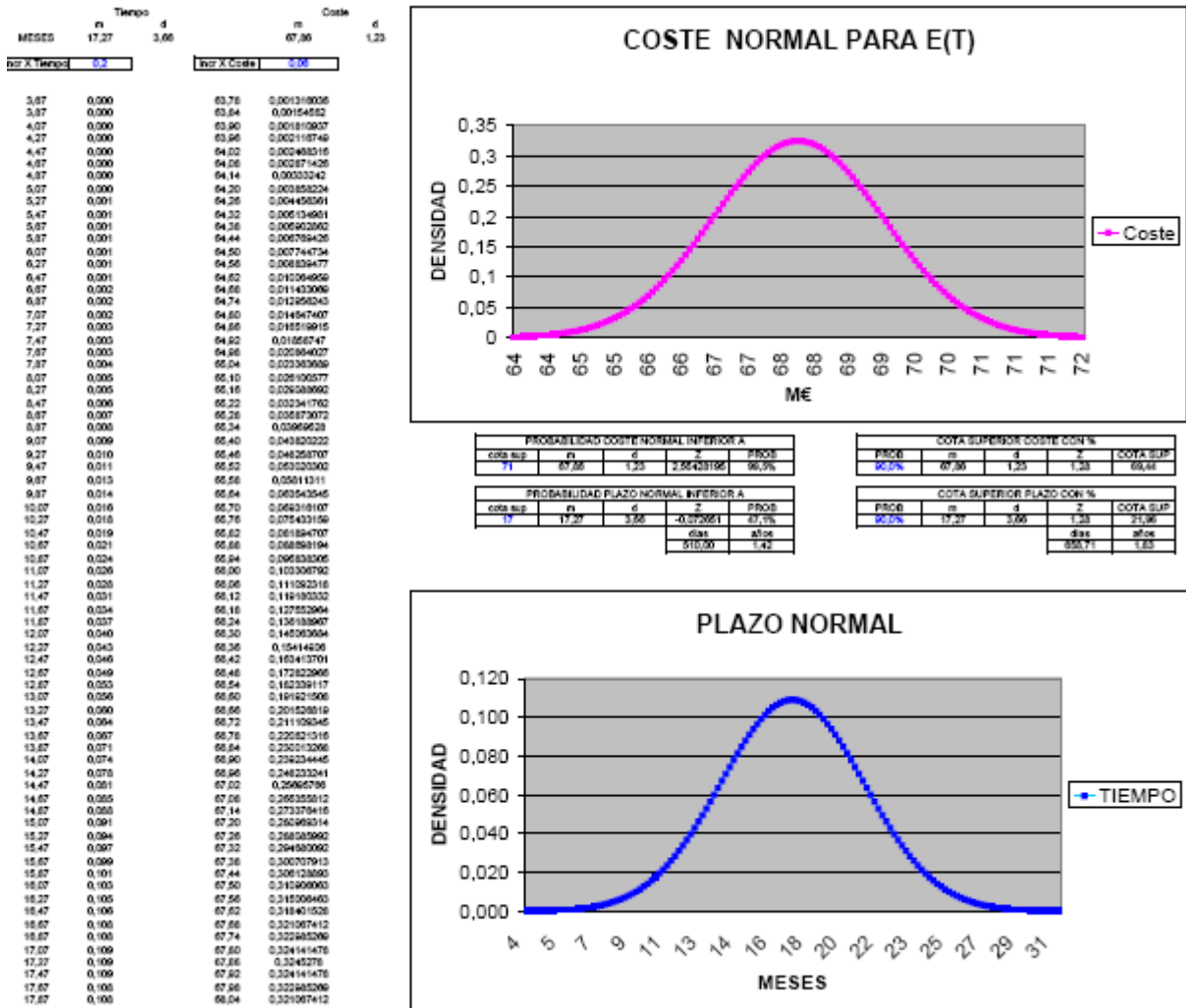


Fig. 28. Gráficas del plazo de ejecución y coste para la Esperanza del Plazo.

Primeramente comentar al respecto de estos gráficos, que las tablas presentadas y que sirven de apoyo al gráfico, están, como ya ha pasado en tablas anteriores cortadas por ser de una magnitud considerable y presentarla de forma entera no aportaría aquí nada. Estas tablas, una para cada gráfica, muestran en la columna de la izquierda el valor del plazo o coste a intervalos regulares (deben definirse en la parte superior de las columnas, mostrados en color azul) a partir de la media calculada.

Como apoyo a las gráficas, entre ellas se presentan unas tablas que permiten un cálculo de la cota superior asociadas a probabilidades, además de la inversa, en la que se calcula la probabilidad asociada a la cota superior de ambas variables. Era este uno de los objetivos de la tesina, el de permitir no sólo acotar los resultados, sino además asociarles una probabilidad con lo que en el momento de toma de decisiones se sepa exactamente qué riesgo se está tomando.

### 7.5. SIMULACIÓN MONTE CARLO

Llegados a este punto podemos ya presentar la tabla en que se fundamenta la simulación de Monte Carlo. Nuevamente se presenta aquí una parte de la tabla, ya que en el modelo se realizan 2000 iteraciones.

PROMEDIO	17,18	tiempo normal - CN										
DESV	3,75	ud	m	d								
		MESES	17,27	3,66								
		DIAS	518	110								
		Costes Normales										
ALEATORIO	T	Ct	desv-t	Cc+MAQ	desv+c+MAQ	Cf	desv-f	TOTAL	DESV	CN-DEF		
0,32160326	22,45	18.152.079,43 €	1.266.736,15 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	72.060.889,70 €	1.615.137,96 €	73.086.626,69 €		
0,05153677	11,30	9.136.371,52 €	632.545,07 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	63.036.181,78 €	1.195.574,38 €	62.429.338,99 €		
0,27395145	15,07	12.181.770,29 €	843.399,39 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	66.080.580,56 €	1.319.314,40 €	64.228.471,33 €		
0,7647622	19,91	16.097.300,21 €	1.114.476,13 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	69.996.110,47 €	1.507.097,17 €	69.672.902,73 €		
0,58454429	18,05	14.593.219,56 €	1.010.343,01 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	68.492.029,83 €	1.431.809,29 €	67.909.349,30 €		
0,94599912	18,64	15.059.681,74 €	1.043.330,27 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	68.969.492,01 €	1.455.274,76 €	71.069.026,53 €		
0,91976143	22,40	18.115.171,14 €	1.264.180,86 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	72.013.981,41 €	1.613.180,47 €	72.160.263,77 €		
0,03539649	10,65	8.613.084,67 €	595.315,97 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	62.511.894,94 €	1.176.808,21 €	63.105.776,31 €		
0,88341273	21,63	17.489.934,53 €	1.210.892,70 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	71.388.734,80 €	1.579.729,71 €	72.133.910,25 €		
0,97896005	24,71	19.977.646,34 €	1.383.126,89 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	73.876.465,61 €	1.715.320,62 €	74.301.377,16 €		
0,46041222	16,90	13.667.020,52 €	946.218,80 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	67.565.830,78 €	1.387.304,89 €	67.472.007,61 €		
0,71760918	19,37	15.655.314,93 €	1.084.568,17 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	69.564.125,19 €	1.486.117,15 €	70.125.891,20 €		
0,9376796	22,89	18.506.596,07 €	1.281.280,59 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	72.405.405,34 €	1.634.308,66 €	74.930.874,79 €		
0,56679732	17,79	14.384.026,18 €	995.869,78 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	68.282.836,46 €	1.421.626,37 €	69.770.570,36 €		
0,07801967	12,07	9.762.620,30 €	675.902,61 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	63.661.430,66 €	1.219.068,98 €	63.038.596,81 €		
0,16746643	13,74	11.107.310,87 €	769.000,55 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	65.008.121,14 €	1.273.046,22 €	66.066.966,40 €		
0,69243101	19,11	15.449.248,38 €	1.069.609,08 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	69.349.058,64 €	1.474.229,08 €	71.210.696,30 €		
0,13745224	13,27	10.729.606,86 €	742.890,70 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	64.628.417,12 €	1.257.422,76 €	63.636.311,21 €		
0,09963221	12,67	10.161.883,57 €	703.545,10 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	64.060.693,84 €	1.234.609,47 €	64.021.121,31 €		
0,76090938	19,86	16.059.434,14 €	1.111.893,82 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	68.969.234,40 €	1.505.169,05 €	72.527.581,99 €		
0,40183621	16,36	13.225.416,42 €	915.644,83 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	67.124.226,68 €	1.366.634,66 €	67.396.473,66 €		
0,51760307	18,36	14.846.751,02 €	1.027.895,94 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	68.746.561,29 €	1.444.248,90 €	70.104.161,29 €		
0,01566134	9,39	7.588.947,16 €	525.411,11 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	61.487.757,43 €	1.142.515,80 €	59.797.915,35 €		
0,87968296	21,49	17.375.831,57 €	1.202.993,62 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	71.274.641,84 €	1.573.683,09 €	69.811.415,60 €		
0,97948354	24,74	20.008.628,58 €	1.395.271,98 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	73.907.438,85 €	1.717.050,75 €	74.977.737,39 €		
0,63020554	18,48	14.945.386,96 €	1.034.724,88 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	68.844.197,23 €	1.448.117,11 €	68.660.725,82 €		
0,04809587	11,10	8.977.088,98 €	621.517,35 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	62.876.899,24 €	1.189.776,72 €	62.667.067,87 €		
0,26034658	14,91	12.057.468,60 €	834.784,97 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	65.966.799,87 €	1.313.830,58 €	65.754.577,72 €		
0,76977993	19,96	16.136.139,89 €	1.117.165,13 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	70.034.969,95 €	1.509.086,73 €	70.686.689,04 €		
0,84779155	21,03	17.000.929,11 €	1.177.037,56 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	70.899.738,37 €	1.553.931,30 €	72.279.204,81 €		
0,4176864	16,61	13.347.466,65 €	924.094,82 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	67.246.275,91 €	1.372.370,49 €	67.013.689,98 €		
0,66967444	18,87	15.260.596,11 €	1.095.547,98 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	68.199.406,38 €	1.484.779,32 €	68.926.672,86 €		
0,47896661	17,07	13.802.116,39 €	966.571,99 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	67.700.926,66 €	1.393.701,07 €	67.996.498,76 €		
0,10867742	12,75	10.310.043,58 €	713.802,77 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	64.208.863,85 €	1.240.483,46 €	64.899.901,79 €		
0,01306398	9,12	7.377.750,71 €	510.789,20 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	61.276.880,98 €	1.136.866,50 €	60.337.638,97 €		
0,62623984	18,43	14.906.173,22 €	1.032.009,96 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	68.804.983,49 €	1.441.179,81 €	69.290.680,77 €		
0,33620696	16,72	12.708.702,18 €	879.540,08 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	66.608.512,46 €	1.342.974,08 €	66.212.114,98 €		
0,504695	17,31	13.995.968,06 €	968.593,06 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	67.894.778,31 €	1.400.937,06 €	66.346.182,75 €		
0,77236175	20,00	16.171.122,66 €	1.119.687,13 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	70.069.932,93 €	1.510.880,60 €	71.366.002,07 €		
0,84495911	20,98	16.965.537,64 €	1.174.687,44 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	70.864.347,91 €	1.562.076,19 €	68.151.244,85 €		
0,16010728	13,47	10.894.952,80 €	754.298,21 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	64.793.783,05 €	1.284.219,37 €	62.628.770,22 €		
0,48331688	17,11	13.837.398,49 €	968.014,77 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	67.736.209,75 €	1.399.377,06 €	68.263.362,39 €		
0,23631542	14,64	11.836.477,94 €	819.414,26 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	65.734.298,21 €	1.304.118,32 €	65.961.498,25 €		
0,54424807	17,67	14.290.164,69 €	989.361,39 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	68.189.974,96 €	1.417.017,79 €	65.794.639,39 €		
0,12026462	12,97	10.487.419,96 €	726.093,20 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	64.388.230,23 €	1.247.590,33 €	64.939.889,65 €		
0,30906259	15,44	12.465.897,98 €	864.446,28 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	66.384.709,26 €	1.332.673,02 €	64.999.831,62 €		
0,31444674	15,60	12.530.881,63 €	867.559,67 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	66.429.691,90 €	1.334.694,98 €	65.107.291,33 €		
0,29028111	15,04	12.325.740,53 €	853.366,98 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	66.224.990,90 €	1.329.708,48 €	65.544.767,65 €		
0,99928179	16,33	13.205.863,00 €	914.290,45 €	47.229.912,04 €	995.618,54 €	6.668.899,23 €	340.500,99 €	67.104.663,27 €	1.368.727,59 €	68.702.141,89 €		

Tabla 8.- Parte de secuencia de iteración simulación de Monte Carlo.

En la primera columna se generan números aleatorios que, mediante la fórmula de la distribución normal, en la que introducimos la media y desviación del tiempo, dan como resultado, en la segunda columna, tiempos posibles para los datos introducidos. Para cada uno de estos tiempos se calcula a continuación el coste dependiente de tiempo simplemente multiplicando dicho plazo de ejecución aleatorio por el coste mensual resultante de los datos introducidos. El mismo proceso se sigue para el cálculo de la desviación.

En el resto de columnas se disponen, en base a los resultados de la *Tabla 7* y en el orden presentado, los costes y desviaciones independientes del tiempo y de maquinaria conjuntamente así como los fijos.

De esta forma llegamos, mediante la suma de normales, al coste total y desviación de cada iteración. En este punto, buscamos de forma aleatoria un valor final de coste para cada iteración en base a los resultados anteriores. Realizadas 2000 iteraciones

calculamos la media de las medias finales así como su desviación estándar. De esta forma hemos introducido el efecto del tiempo en el cálculo del coste final en forma de normal.

Es de destacar que la media resultante, como no puede ser de otra manera, permanece prácticamente exacta, hasta el primer decimal y esa ha sido la medida para definir el número de iteraciones finales, mientras que la desviación crece de forma más abultada, precisamente por ese mencionado efecto del tiempo.

Esta solución puede verse gráficamente en la figura presente en la misma hoja de cálculo y que se muestra a continuación.

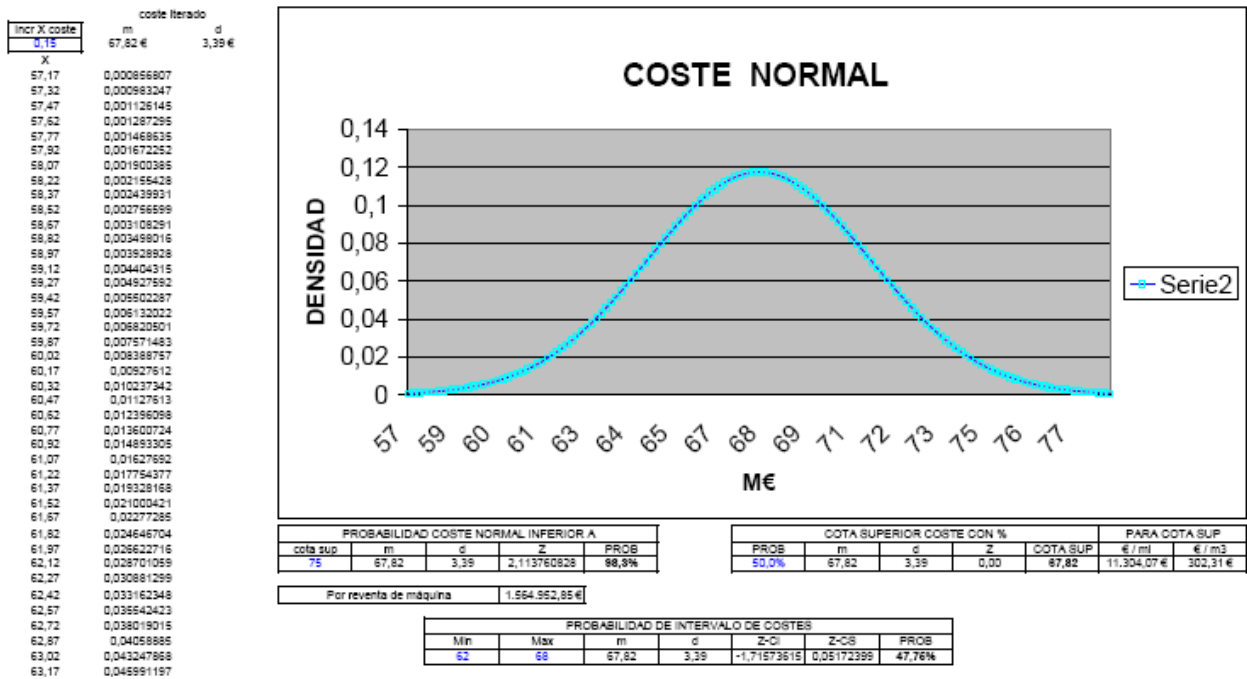


Fig. 29. Gráfica de Coste de ejecución.

Este gráfico sigue el mismo patrón que el ya expuesto para la Figura 28. Se introducen, no obstante, dos modificaciones.

La primera de ellas es la de mostrar el valor residual de la maquinaria en el caso de que no haya pérdida de la misma en la ejecución del túnel. Este valor corresponde al 10% del valor en maquinaria calculado y se sustenta en la información aportada por las casas de tuneladoras. Dicho valor, no se ha incluido no obstante en el resultado final ya que no hay garantía de que pueda reutilizarse la máquina ni del coste que pueda tener la máquina una vez acabada la obra. Se trata pues de un dato puramente informativo que pretende dar no sólo un orden de magnitud sino además de recordar una posibilidad que a menudo no considerada por los distintos agentes que intervienen en la ejecución de una obra de este tipo.

La segunda modificación respecto la Figura 28 reside en la introducción de una tabla que permite el cálculo de la probabilidad del intervalo del coste a definir por el usuario, en las casillas con los valores en color azul, lo que servirá para asociar un riesgo a un intervalo con sus respectivas cotas superior e inferior hecho éste que puede ser de máximo interés para el estudio de alternativas en la fase de estudio o incluso para la empresa constructora en un análisis de riesgos.



### 7.6. HOJA RESUMEN

Para finalizar este apartado, comentar la última de las tablas que componen el modelo generado y que corresponde a un resumen tanto de los datos como de los resultados más destacables.

Como puede observarse a continuación, en la parte superior se presentan las características principales, tanto las relativas a la maquinaria como a las condiciones de contorno, zonificadas para un mejor entendimiento del caso. Se incluyen a su vez algunos resultados parciales útiles para el estudio de cada alternativa como las esperanzas de producción y el tiempo de cada zona.

RESUMEN RESULTADOS ESTUDIO DE PLAZOS Y COSTES ( P.E.M. ) DEL TÚNEL										
<b>CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES</b>										
TUNELADORA	EPB				<b>PRODUCCION ( M / MES)</b>		ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4
ESCUDO	SIMPLE				ZONA	URBANO URBANO NO URBANO URBANO				
DIAMETRO ( M )	8,90				LONGITUD ZONA ( M )	4000 500 1000 500				
DIAMETRO INTERNO( M )	8,01				ESPERANZA T (MES)	12,01 1,61 2,26 1,49				
GRUESO DOVELAS ( M )	0,30				DESVIACION T (MES)	3,67 0,45 0,50 0,44				
LONGITUD TOTAL ( M )	6000				MATERIAL (+PROBABLE)	SUELO SUELO SUELO MIXTO				
SUPERFICIE UTIL ( M2 )	28,38				AGUA (+PROBABLE)	SI SI SI SI				

PLAZOS ( MES )	<b>PROBABILIDAD PLAZO NORMAL INFERIOR A</b>							
	cota sup	m	d	Z	días	años	PROB	
	18	17,27	3,86	0,20	540,00	1,50	57,9%	
	<b>COTA SUPERIOR PLAZO CON %</b>							
	PROB	m	d	Z	días	años	COTA SUP	
	50,0%	17,27	3,86	0,00	517,98	1,44	17,27	
<b>INTERVALO PLAZO NORMAL</b>								
MIN	MAX	días MIN	días MAX	años MIN	años MAX	PROB		
14	21	420,00	830,00	1,17	1,75	66,00%		

COSTES ( M€ )	<b>PROBABILIDAD COSTE INFERIOR A</b>							
	cota sup	m	d	Z	€/ ml	€/ m3	PROB	
	68	67,84	3,24	0,05	11.333,33 €	303,09 €	52,0%	
	<b>COTA SUPERIOR COSTE CON %</b>							
	PROB	m	d	Z	€/ ml	€/ m3	COTA SUP	
	50,0%	67,84	3,24	0,00	11.306,04 €	302,36 €	67,84	
<b>PROBABILIDAD DE INTERVALO DE COSTE</b>								
MIN	MAX	€/ ml MIN	€/ ml MAX	€/ m3 MIN	€/ m3 MAX	PROB		
62	88	10.333,33 €	11.333,33 €	276,35 €	303,09 €	48,44%		

DESGLOSE COSTES ( € )	<b>PARTIDA</b>		<b>TOTAL</b>
	Material		17.742.748,66 €
	Equipamiento		17.874.948,96 €
	Personal		12.431.470,07 €
	Implantación y retirada		3.307.333,33 €
	Transporte		3.826.229,76 €
	Coste Indirecto		7.739.913,19 €
	Contingencias		1.518.896,00 €
	Partes adicionales		3.320.481,22 €
	<b>Coste Total Para E ( T )</b>		<b>67.860.019,18 €</b>

<b>DESGLOSE DE COSTES PARA E ( T )</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Material</li> <li>■ Equipamiento</li> <li>■ Personal</li> <li>■ Implantación y retirada</li> <li>■ Transporte</li> <li>■ Coste indirecto</li> <li>■ Contingencias</li> <li>■ Partes adicionales</li> </ul>

Tabla 9.- Resumen de datos y resultados.

En segundo lugar tenemos unas tablas que permiten el estudio estadístico de intervalos, cotas y probabilidades tanto del plazo como del coste, con las gráficas de sus distribuciones normales a su derecha que dan una idea visual clara de los resultados del modelo. Puede observarse que se incluyen aquí los costes por metro lineal así como por metro cúbico de excavación.

Finalmente, en la parte inferior tenemos un desglose de costes tanto en tabla como gráficamente en base al coste para la esperanza del tiempo y cuyas partidas se basan en aquellas empleadas en las exposiciones de la I.T.A. tal como se expone en el punto 8.4 correspondiente al apartado siguiente.

Se ha detallado de forma precisa la metodología que nos ha llevado a este resultado final. Es ahora el momento de precisar de forma clara qué datos debemos introducir en la hoja de cálculo que realizará la simulación, éstos se enumeran a continuación:

- Ubicación de la obra o tipo de zona.
- Diámetro.
- Longitud.
- Material a excavar.
- Presencia de Agua.
- Tipo de Tuneladora.
- Tipo de Escudo.
- Distancia de transporte de la tuneladora.
- Disponibilidad de fábrica de dovelas.
- Año de ejecución del túnel.
- Inflación Media anual prevista hasta el año de ejecución.

Existen además varias variables auxiliares que si bien no son necesarias para el funcionamiento de la simulación se incluyen para tener en cuenta factores que pueden resultar interesantes en cuanto a la información que proporcionan para el que la maneja como son:

- Factor de rendimiento de la tuneladora.
- Pérdida de máquina.
- Cotas inferiores y superiores así como probabilidades para el estudio estadístico.

## **8. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL MODELO**

### **8.1. INTRODUCCIÓN**

Hasta aquí se ha planteado un modelo en el que han sido necesarios múltiples datos obtenidos con mayor o menor precisión, además de haber realizado hipótesis y simplificaciones inevitables por otra parte al enfrentarse a un problema de tantas variables.

Resta ahora pues, realizar una serie de comprobaciones que nos deberán confirmar si la metodología general ha sido la correcta y poder así validar el modelo desarrollado en base a resultados sólidos. En el caso de que los resultados muestren incongruencias será preciso un estudio de las causas además de sus implicaciones.

Para ello utilizaremos en este apartado resultados de la base de datos con la que se sustenta el modelo. Es importante recordar que si bien se analizaron tanto la relación