

# ANÁLISIS DE RIESGOS GEOLÓGICOS EN LOS TÚNELES Y SU INFLUENCIA EN EL COSTE Y PLAZO DE EJECUCIÓN

Manuel Arlandi Rodríguez. Director Técnico. GEOCONSULT  
Francisco Cornejo Rojo. Delegado País vasco. GEOCONSULT.

## 1. OBJETO DEL ANÁLISIS DE RIESGOS

Al contrario que en otras obras o actuaciones realizadas en la superficie, la ejecución de trabajos subterráneos lleva asociada un alto rango de incertidumbre, debido principalmente a la imposibilidad de conocer con precisión la geología con que se va a enfrentar el avance de la obra.

Por supuesto, todas las incógnitas que presenta la geología tratan de ser desveladas mediante sondeos, ensayos en laboratorio de muestras obtenidas de la traza de la obra, etc., pero siempre se llega a una serie más o menos grande de datos puntuales a partir de los cuales se debe extrapolar el comportamiento de formaciones geológicas, que rara vez se pueden considerar totalmente homogéneas.

Uno de los principales hitos a la hora de estudiar un proyecto de túneles consiste en la estimación de sus plazos y costes de construcción. Tradicionalmente, una vez conocido el trazado, el valor medio de los parámetros que determinan el diseño a lo largo del túnel, sus secciones tipo y sostenimientos, es posible estimar costes y plazos medios esperados, siempre que puedan conocerse los rendimientos medios y los costes medios de excavación, transporte y desescombro.

Cabe, sin embargo, plantearse los siguientes interrogantes:

- ¿Qué probabilidad hay de cumplir el plazo y coste medios?
- ¿Cuál es la probabilidad de que el plazo sea inferior a uno dado?
- ¿Cuál es la dispersión / fiabilidad que ofrecen los plazos y costes medios?

Abordar cuestiones solo puede enfocarse mediante técnicas estadísticas, que como datos de entrada empleen las funciones de distribución de la calidad geotécnica del terreno y sus sostenimientos asociados en los diversos tramos del túnel. Renunciar a hacer este planteamiento probabilístico supone implícitamente, adoptar soluciones al 50% de probabilidad (valores medios).

Para abordar este problema, GEOCONSULT, ha desarrollado una metodología plasmada en el programa informático GEOSAR, desarrollado en el marco de un convenio suscrito con el M.I.T (Massachusetts Institute of Technology, EEUU), y el laboratorio de Mecánica de Roca de la Universidad Politécnica de Laussane (SUIZA).

El programa funciona partiendo de las distribuciones estadísticas de distribución de sostenimientos de cada tramo en que se subdivide el túnel. Con ella se realiza un proceso iterativo de simulación estadística mediante el método de Monte Carlo, como resultado del cual se obtiene una muestra de valores (tan amplia como se desee), que representa todas las posibles combinaciones de sostenimientos que pueden producirse durante la ejecución de la obra. Sobre el resultado de la simulación se realiza un tratamiento estadístico, que proporciona información detallada sobre probabilidades / distribución de coste y plazo, dispersión de los resultados, valores con un determinado nivel de confianza, etc. Este proceso se le denomina Análisis de Riesgos Geológicos en la Distribución de Sostenimientos.

Además de las funciones de distribución de tipos de sostenimiento, el programa requiere conocer el coste unitario de cada sostenimiento, así como el rendimiento de ejecución. De este modo, cada vez que el programa asigna en cada iteración un tipo de sostenimiento para cada tramo, automáticamente se le asigna en esa iteración un coste y un rendimiento.

Como resultado, el programa proporciona, para cada túnel estudiado, una nube de puntos en un diagrama coste-plazo. Cada punto de esta nube corresponde a cada una de las iteraciones realizadas. Esta información se proporciona tanto numérica como gráficamente.

## 2. RIESGOS GEOLÓGICOS EN LOS TÚNELES EN ROCA

Los riesgos geológicos, en función de su posible afección sobre el coste y plazo de ejecución, pueden clasificarse en los siguientes tipos (Isaksson, 2002):

1. **RIESGOS NORMALES**: en este tipo se consideran las variaciones de los porcentajes previstos de calidad geotécnica del terreno. La aparición de mayores

porcentajes de terreno de peor calidad que la inicialmente prevista, tiene cierto impacto sobre el coste y plazo de obra.

2. **RIESGOS EXCEPCIONALES:** se trata de riesgos que afectan al túnel de manera puntual, pero que su aparición puede suponer un coste y plazo extra. Dentro de este grupo se incluyen por ejemplo la aparición de fallas, súbitas infiltraciones de agua, aparición de grandes cavidades, etc.

A continuación se incluye una tabla donde se resumen los principales riesgos geotécnicos en la ejecución de los túneles, valorando su potencial incidencia en la construcción de los mismos. La tabla resulta de especial utilidad para valorar la probabilidad de ocurrencia de riesgos de tipo excepcional.

TIPO DE SITUACIÓN DE RIESGO GEOLÓGICO	FRECUENCIA		GRAVEDAD DEL RIESGO		
	Roca Sedimentaria	Roca ígnea o metamórfica	Excavación convencional	Tuneladora cerrada (Escudo)	Tuneladora abierta (Topo)
<b>ORIGEN LITOESTRATIGRÁFICO</b>					
Variación de espesor de capas sedimentarias	1	0	2	1	1
Variación lateral de facies	2	1	2	1	2
Facies pulverulentas en formaciones cohesivas (lentejones arenosos en arcillas, arenas en areniscas, cuarcitas y dolomías, etc.)	2	0	2	1	2
Heterogeneidades litológicas (sílex, bloques erráticos, túneles de lava, cantos rodados en la base de aluviales, etc.)	2	0	0	2	1
Expansividad o exfoliación después de la excavación (margas piríticas, montmorillonita, anhidrita, etc.)	1	0	2	1	1
Abrasividad inesperada de la roca	1	2	0	2	2
Exceso de polvo silíceo	1	1	2	0	1
<b>ORIGEN GEOMORFOLÓGICO</b>					
Valles fósiles, cañones subglaciales	1	1	2	0	2
Profundización anormal del frente de alteración, presencia de rocas alteradas bajo rocas sanas.	2	2	2	1	2
Deslizamientos profundos o descompresión de pie de ladera	2	2	1	1	1
Caída de bloques, inestabilidad en clave	2	2	2	1	1

TIPO DE SITUACIÓN DE RIESGO GEOLÓGICO	FRECUENCIA		GRAVEDAD DEL RIESGO		
	Roca Sedimentaria	Roca ígnea o metamórfica	Excavación convencional	Tuneladora cerrada (Escudo)	Tuneladora abierta (Topo)
<b>ORIGEN TECTÓNICO</b>					
Fallas	2	2	2	2	2
Corredor de fracturas poco espaciadas	1	2	1	0	1
Vetas de rocas muy duras (o muy descompuestas)	0	2	1	0	2
Disposición imprevista de capas (repliegue...)	1	0	1	0	1
Lajado (spalling) debido al exceso de tensiones	1	1	1	Ns	2
Convergencias decimétricas o más debidas al exceso de tensiones	1	1	1	Ns	1
<b>ORIGEN HIDROGEOLÓGICO</b>					
Nivel freático anormalmente alto	1	1	1	0	1
Llegadas de agua superiores a las previsiones	2	2	2	0	2
Desconfinamiento hidráulico de materiales sueltos	1	1	2	1	2
Karst	2	0	2	2	2
Agresividad de las aguas subterráneas	1	1	1	0	1
Inundación del frente del túnel	1	1	1	1	1
Gases nocivos (CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> S, CO <sub>2</sub> ), asfixia	1	1	1	0	1
Explosión de grisú	1	0	2	0	2
<b>ORIGEN ANTRÓPICO</b>					
Antiguas cimentaciones, pilotes, tablestacas...	1	0	0	2	1
Cavidades abandonadas o desconocidas (cuevas, minas, galerías, pozos, etc..)	2	0	1	2	1
Fosos, trincheras o vaguadas rellenados por el hombre	1	0	1	0	1
Bombas	1	0	2	2	2
Polución del suelo	1	1	1	1	1

Escala de frecuencia de la situación de riesgo ==>

Escala de gravedad del riesgo ==>

0: No existe	1: Raro	2: Frecuente	
0: Despreciable	1: Escaso	2: Fuerte	Ns: No significativo

TABLA: Riesgos geológicos en la construcción de túneles

### 3. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS

La metodología de análisis de riesgo varía con el tipo de riesgo a evaluar. Aunque se emplea metodología estadística, no se aplica el mismo método para riesgos normales y riesgos excepcionales.

La valoración de los riesgos normales, y en particular las variaciones de calidad geotécnica del terreno, se realizan valorando la probabilidad de desviaciones a partir de la Función de Distribución de Probabilidad del índice geomecánico que se aplique para valorar la calidad del terreno (RMR, Q, RMi, etc.). Por tanto, se requiere determinar, durante la campaña geotécnica, dichas funciones de distribución.

Las series de eventos o riesgos excepcionales que pueden tener lugar en un túnel son del tipo conocido en estadística como “Cadenas de Markov”. En este tipo de series de eventos, la probabilidad de que ocurra un evento depende del evento inmediatamente anterior. De este modo, estas cadenas recuerdan los eventos ya acaecidos y condicionan la probabilidad de los eventos futuros.

Como ejemplo ilustrativo de las Cadenas de Markov puede visualizarse la presencia de fallas cargadas de agua. La aparición de la primera falla conlleva cierto coste adicional y retraso en las obras. Cuando aparece una segunda falla, probablemente los geólogos de túnel ya han aprendido lo suficiente del terreno para tratar de anticipar la presencia de la misma, y los constructores están mejor preparados para atravesarla, con coste más reducido y menor plazo. A medida que se suceden las fallas, éstas se irán detectando de manera más rápida y eficaz, y el coste y plazo de excavarlas será cada vez menor. En esta serie de eventos, la probabilidad de que la falla se atravesase con un coste o plazo elevado es cada vez menor, pues la obra aprende a detectarla y a excavarlas de manera rápida y económica. Constituyen por tanto, una Cadena de Markov.

Por tanto, para valorar los riesgos excepcionales, se requiere determinar la probabilidad de un evento individual, a partir de los reconocimientos geotécnicos realizados.

### 3.1. ANÁLISIS DE LOS RIESGOS NORMALES

Como se ha indicado anteriormente, el análisis denominado de “Riesgos Normales”, permite determinar las máximas variaciones esperables en el coste y plazo de la obra.

El procedimiento habitualmente empleado en la redacción de los proyectos con el fin de evaluar el coste y plazo de una obra, considera los valores medios de distribución de sostenimientos. Para acotar los valores máximos y mínimos del coste y plazo, se podría considerar el coste y plazo resultante de considerar que todo el túnel se ejecuta con el sostenimiento más pesado (valores máximos) y con los más ligeros (valores mínimos). Pero esta acotación no es realista, ya que la probabilidad de que sucedan los casos extremos citados es prácticamente nula. El análisis de riesgos normales que aquí se describe, es capaz de acotar dichos valores, para intervalos de confianza prefijados, lo que sin duda es un dato de mayor utilidad y realismo.

El proceso de análisis de riesgos normales se desarrolla de acuerdo a los siguientes pasos:

1. Generación de funciones de distribución de calidad geomecánica a partir de los datos obtenidos en las campañas de reconocimientos geotécnicos.
2. Determinación del coste y plazo de cada ciclo de avance del túnel. Estos costes y plazos son los correspondientes a cada tipo de sostenimiento, que a su vez se asocia a intervalos determinados de calidad geomecánica.
3. Sectorización del túnel, por tramos de terreno de con estructura geológica y propiedades geotécnicas similares. A cada sector se le asigna una función de distribución de la calidad geomecánica.
4. Realización de un muestreo estadístico mediante el procedimiento Montecarlo o Hipercubo Latino. Este proceso genera números aleatorios, que determinan en cada iteración un valor de clasificación geomecánica para cada sector en el que se ha subdividido el túnel. Cada uno de dichos valores de clasificación geomecánica lleva aparejado un tipo de sostenimiento, que a su vez tiene asociado un coste y un plazo de ejecución. Con todas las iteraciones realizadas se obtienen una gráfica coste-plazo, donde se representa la nube de puntos obtenida. Este gráfico acota el coste y plazo, y determina el valor más probable del mismo.

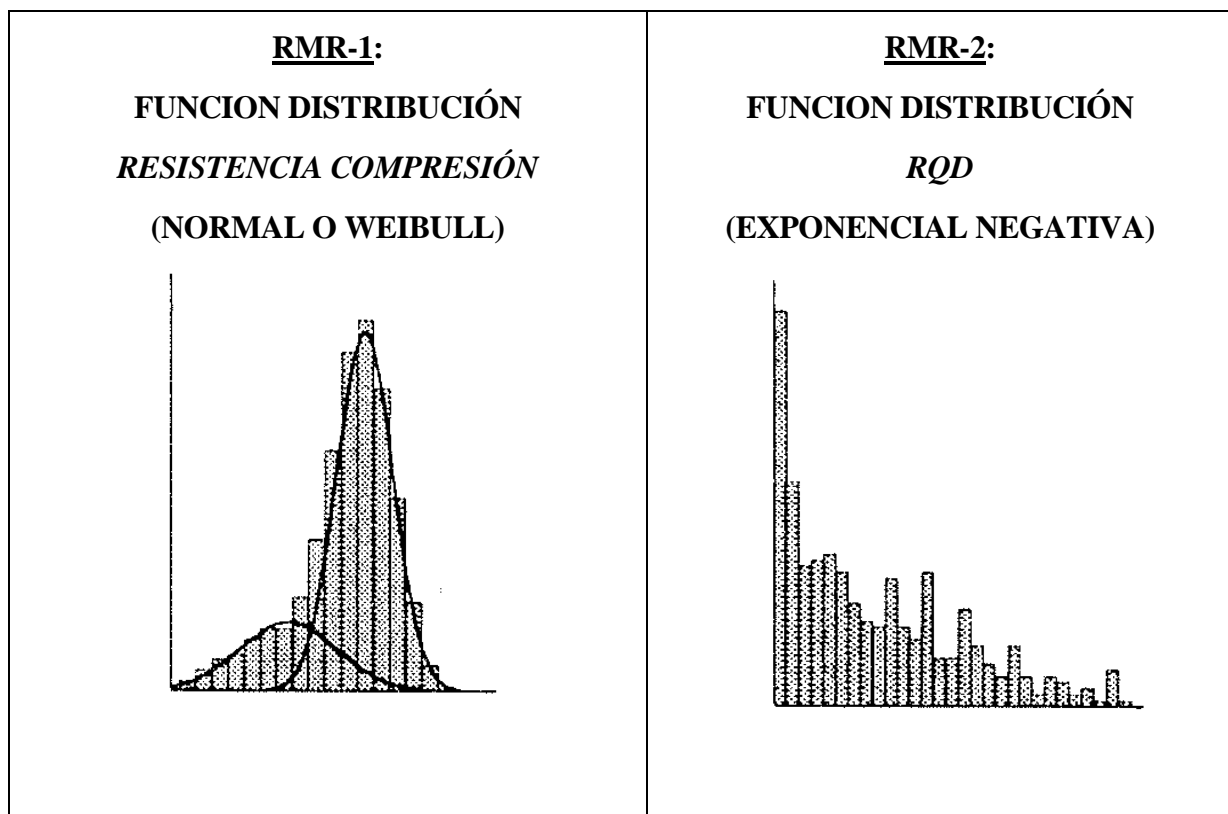
A continuación se detallará el proceso de cada uno de estos pasos.

### 3.1.1. DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DEL RMR

A priori, de acuerdo con el Teorema Central de Límite, en condiciones muy generales, la distribución de la suma de variables aleatorias tiende a una distribución normal (también llamada distribución gaussiana o curva de Gauss o campana de Gauss) cuando la cantidad de variables es muy grande. De acuerdo con este teorema, cabría esperar que la función de distribución del RMR fuese de tipo normal, ya que este índice geomecánico se construye a partir de seis variables, de naturaleza claramente aleatoria:

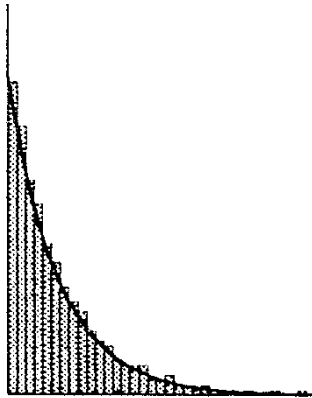
$$\overline{RMR} = \sum_{I=1}^{I=6} RMR_I$$

Para corroborar esta hipótesis, diversos autores han realizado estudios para verificar las características de la función de distribución de RMR. Kalamaras (1996), ha realizado un estudio riguroso, partiendo de las funciones de distribución de las variables independientes del RMR:



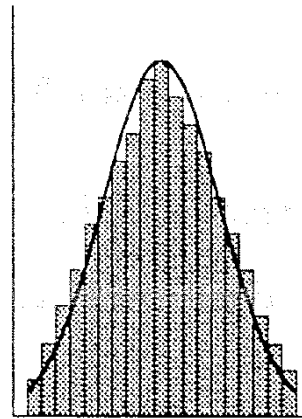
**RMR-3:**

**FUNCIÓN DISTRIBUCIÓN  
ESPACIADO DISCONTINUIDADES  
(EXPONENCIAL NEGATIVA)**



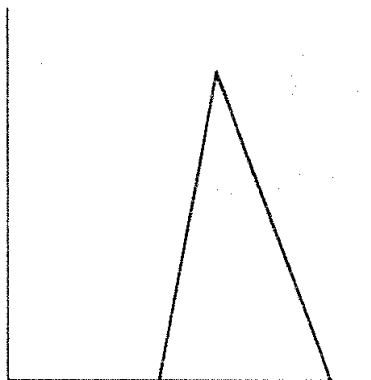
**RMR-4:**

**FUNCIÓN DISTRIBUCIÓN  
ESTADO DISCONTINUIDADES  
(NORMAL)**



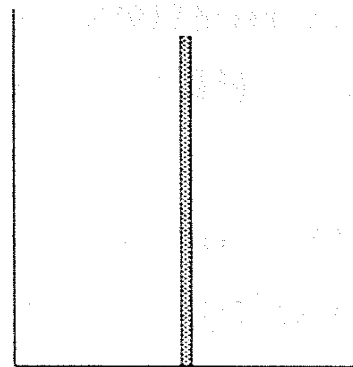
**RMR-5:**

**FUNCIÓN DISTRIBUCIÓN  
PRESENCIA DE AGUA  
(TRIANGULAR)**



**RMR-6:**

**FUNCIÓN DISTRIBUCIÓN  
CORRECCIÓN ORIENTACIÓN DIA-  
CLASAS  
(CONSTANTE)**





A partir de dichas funciones de distribución, realizó una simulación numérica mediante la técnica de muestreo denominada “Hipercubo Latino”. Este método crea números aleatorios, que se aplican a cada una de las funciones de distribución de las variables independientes de RMR. Sumando los valores obtenidos se obtiene la función de distribución de RMR:

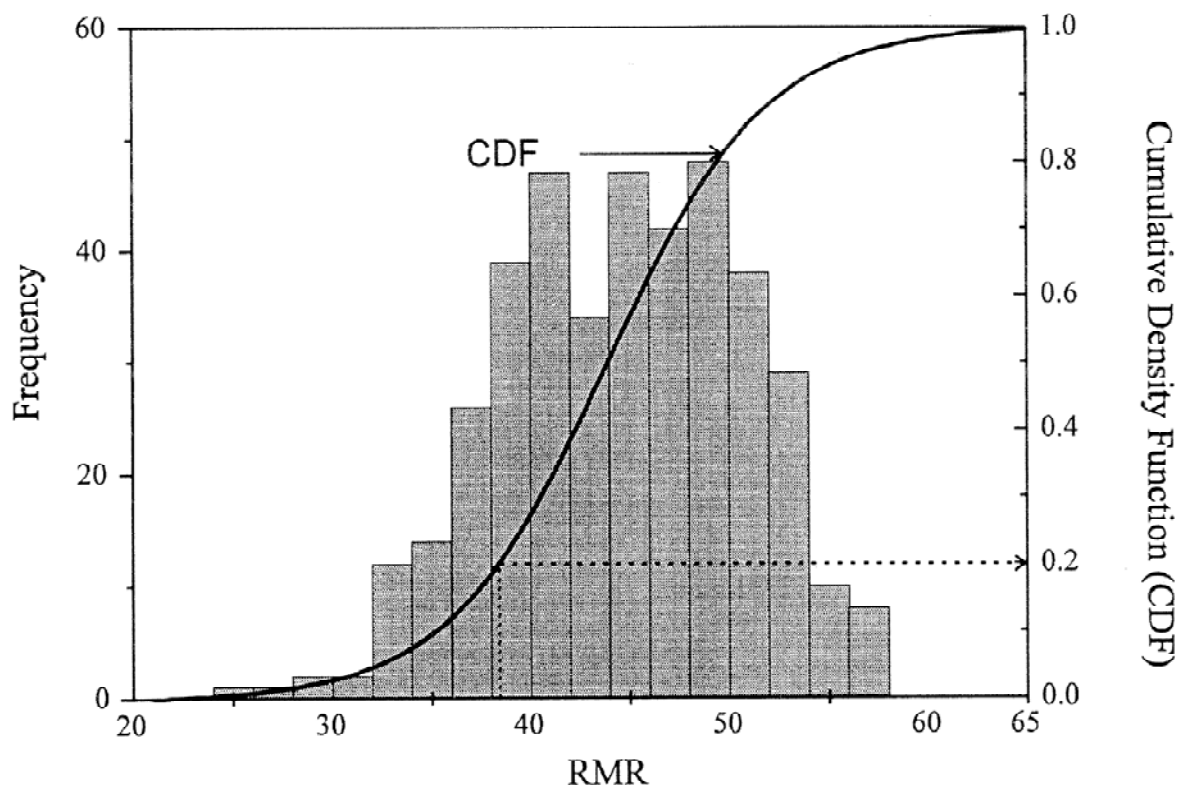


FIGURA: Función de distribución del RMR obtenida a partir de muestreo mediante la técnica del Hipercubo Latino

De este modo se comprueba que la función de distribución del RMR corresponde a una distribución normal.

En la práctica de los estudios geotécnicos, para obtener las funciones de distribución se opera del mismo modo que el procedimiento descrito. Previamente es necesario obtener las funciones de distribución de los distintos sumandos que forman parte del RMR. Estas funciones se obtienen confeccionando histogramas a partir de los datos obtenidos de las diferentes técnicas de reconocimiento geotécnico empleadas en la investigación de los túneles:

VARIABLE	MÉTODO HABITUAL	MÉTODO ALTERNATIVO
<b><u>RMR-1:</u></b> <i>Resistencia a Compresión</i>	Ensayos de Laboratorio	-
<b><u>RMR-2:</u></b> <i>Rock Quality Designation (RQD)</i>	Testificación de Sondeos	-
<b><u>RMR-3:</u></b> <i>Espaciado Discontinuidades</i>	Estaciones Geomecánicas	Registro Televier
<b><u>RMR-4:</u></b> <i>Estado de las Discontinuidades</i>	Testificación de Sondeos	Estaciones Geomecánicas
<b><u>RMR-5:</u></b> <i>Presencia de Agua</i>	Registro de niveles en Sondeo	-
<b><u>RMR-6:</u></b> <i>Corrección por orientación de Diaclasas</i>	Estaciones Geomecánicas	Registro Televier

TABLA: Métodos para la obtención de histogramas de las variables del RMR

A continuación se incluyen una serie de histogramas obtenidos a partir de la metodología descrita en la tabla anterior:

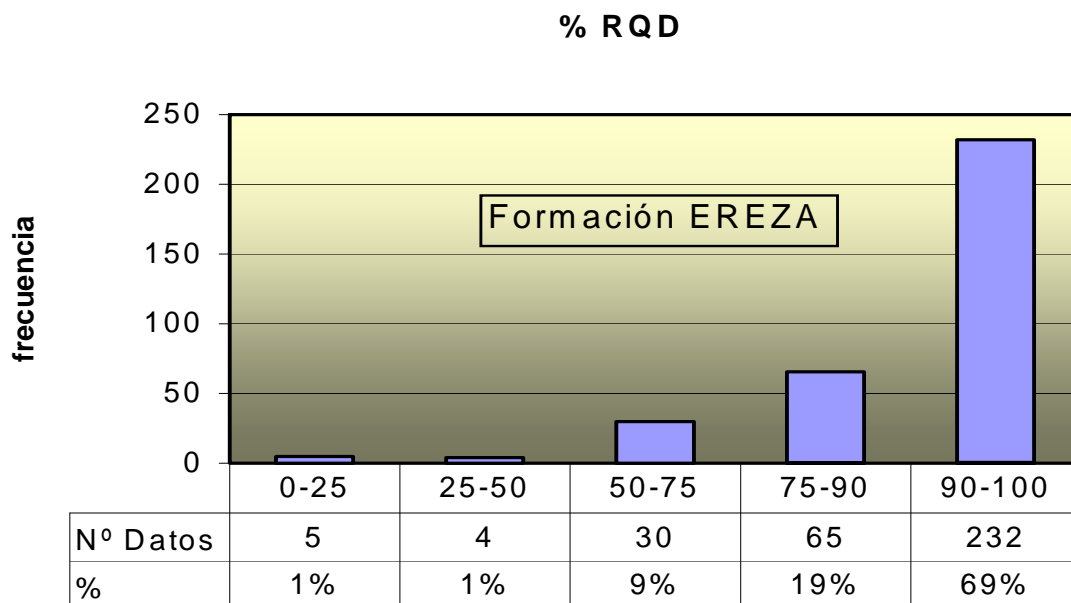


FIGURA: Histograma RQD obtenido a partir de datos de sondeos

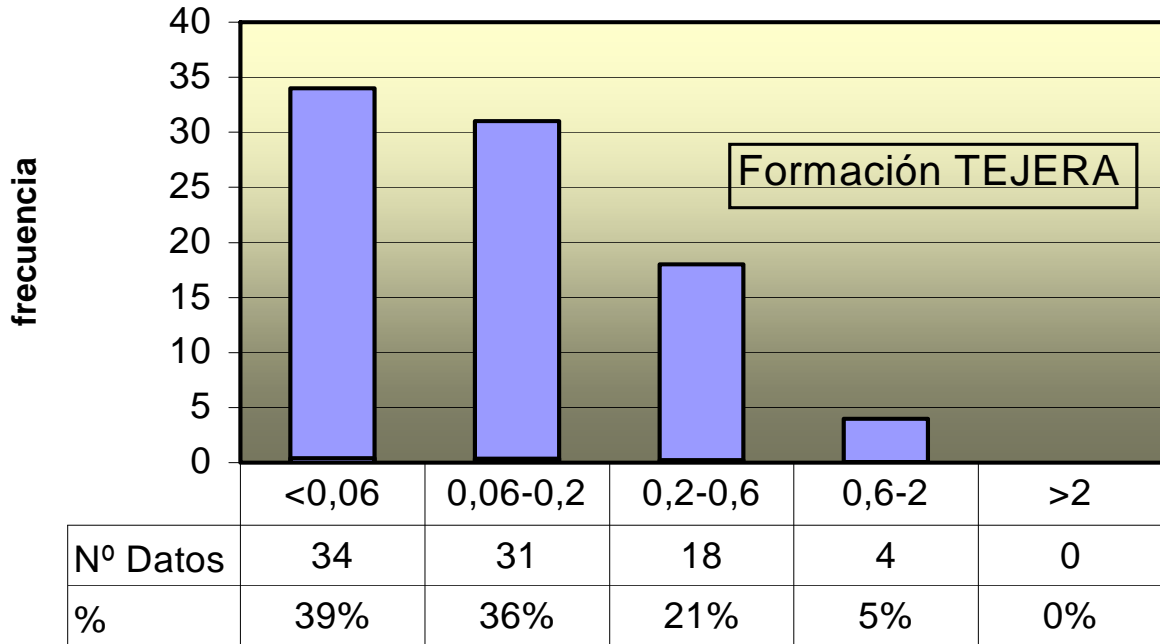


FIGURA: Histograma espaciado de discontinuidades, obtenido a partir de estaciones geomecánicas

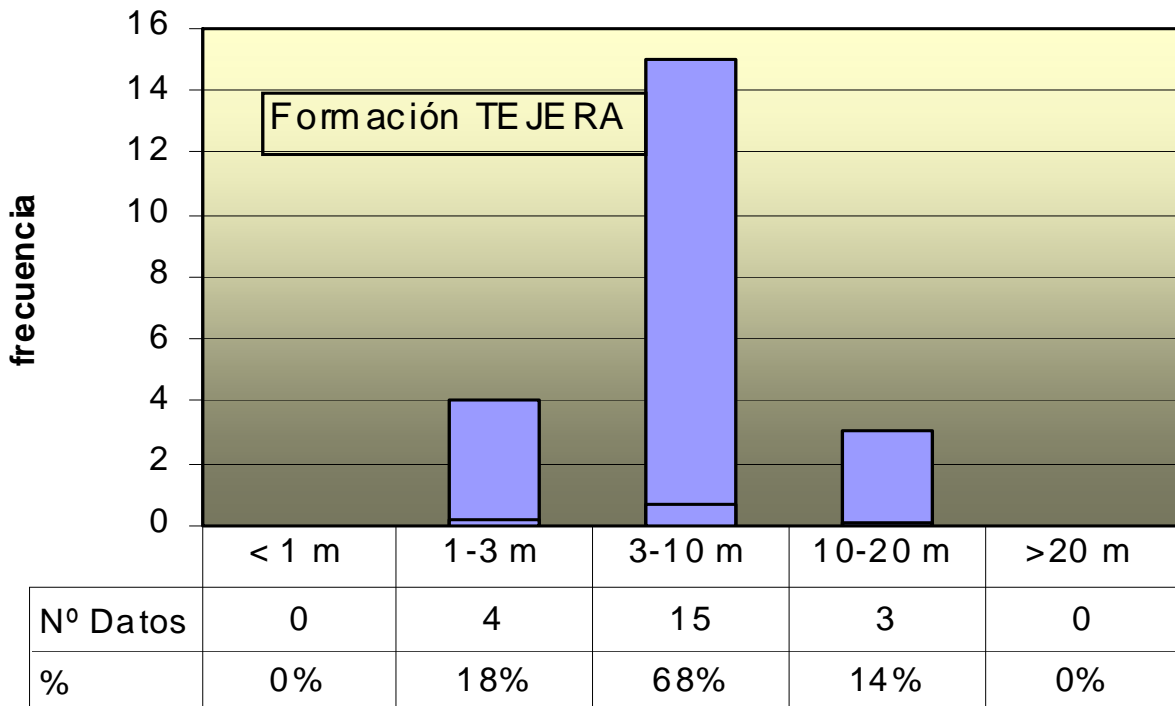


FIGURA: Histograma de persistencia, obtenido a partir de estaciones geomecánicas

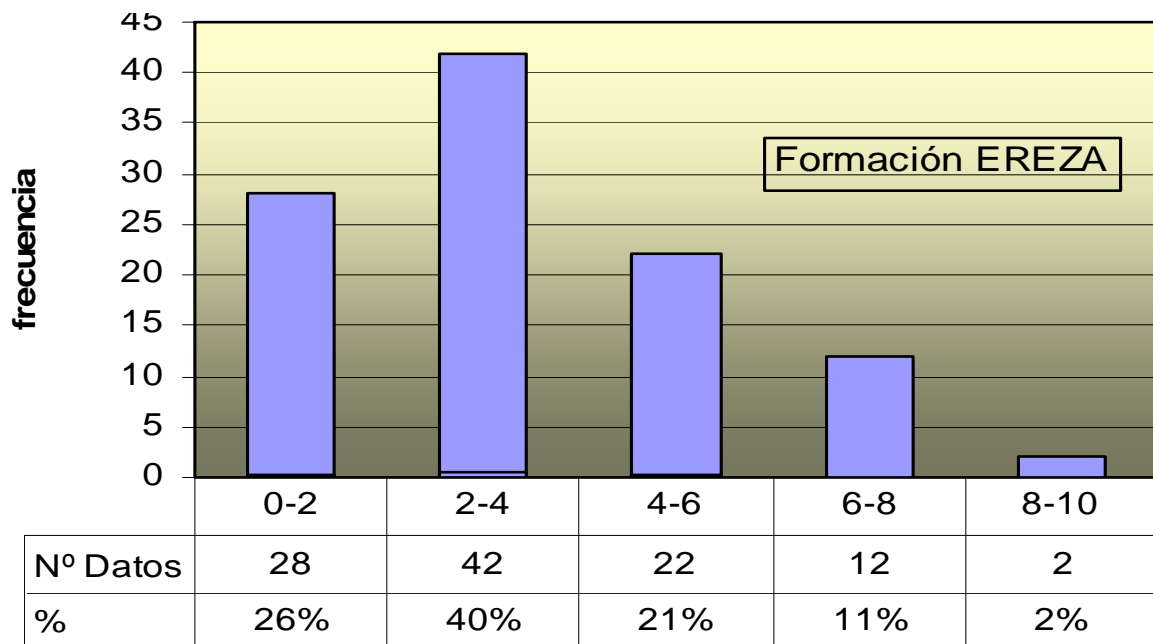


FIGURA: Histograma de rugosidad de las juntas obtenido de la testificación de los sondeos

A partir de estas distribuciones, se obtienen las funciones de distribución del RMR, empleando la técnica de muestreo del Hipercubo Latino, Montecarlo. A continuación se ilustra el tipo de resultado obtenido.

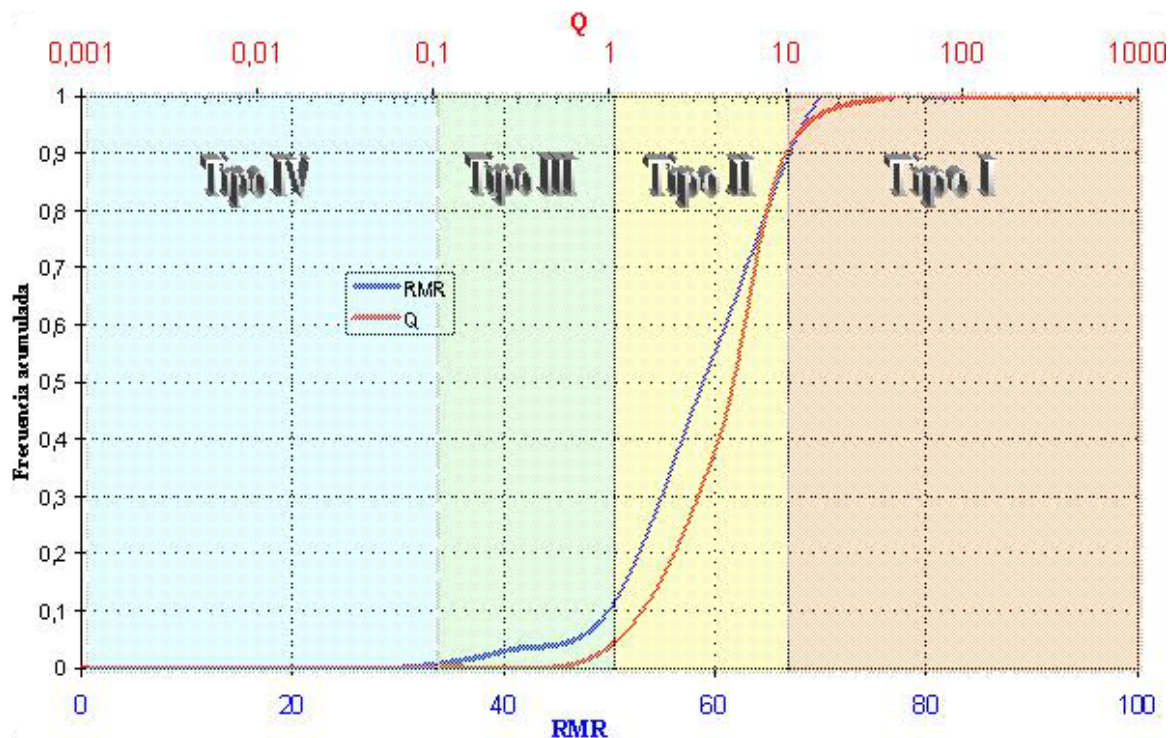


FIGURA: Histograma del RMR

Este tipo de técnica estadística se desarrolla con facilidad mediante hojas de cálculo.

### 3.1.2. DETERMINACIÓN DE LOS PLAZOS Y COSTES DE CADA TIPO DE SOSTENIMIENTO

Como se ha indicado, cada intervalo de calidad geomecánica lleva asociado un tipo de sostenimiento.

Para realizar el análisis se requiere determinar el coste por metro lineal de cada sostenimiento, así como el rendimiento de ejecución previsto. La primera labor es fácil de desarrollar a partir de las mediciones y precios unitarios de los distintos elementos de que consta la sección tipo de cada sostenimiento. La valoración del rendimiento requiere un conocimiento preciso de las labores realizadas en cada ciclo de avance, estableciendo tiempos de duración de cada actividad, a partir de los rendimientos unitarios de trabajo proporcionados por la maquinaria empleada.

Como resultado de este proceso, se genera una tabla como la que se adjunta a continuación:

RMR	SOSTENIMIENTO ASIGNADO	COSTE (Euro/ml)	RENDIMIENTO (m/día)
100 – 80	Tipo I	10.628	8
80 – 60	Tipo II	12.271	6
60 – 40	Tipo III	13.018	4
40 – 20	Tipo IV	15.787	2
< 20	Tipo V	23.200	1,5

### 3.1.3. SECTORIZACIÓN DEL TÚNEL

Se realiza una sectorización del túnel, para subdividir el mismo en tramos de estructura geológica y propiedades geotécnicas homogéneas. A cada sector se le asocia una función de distribución de calidad geomecánica, tal como se ilustra en la figura adjunta.

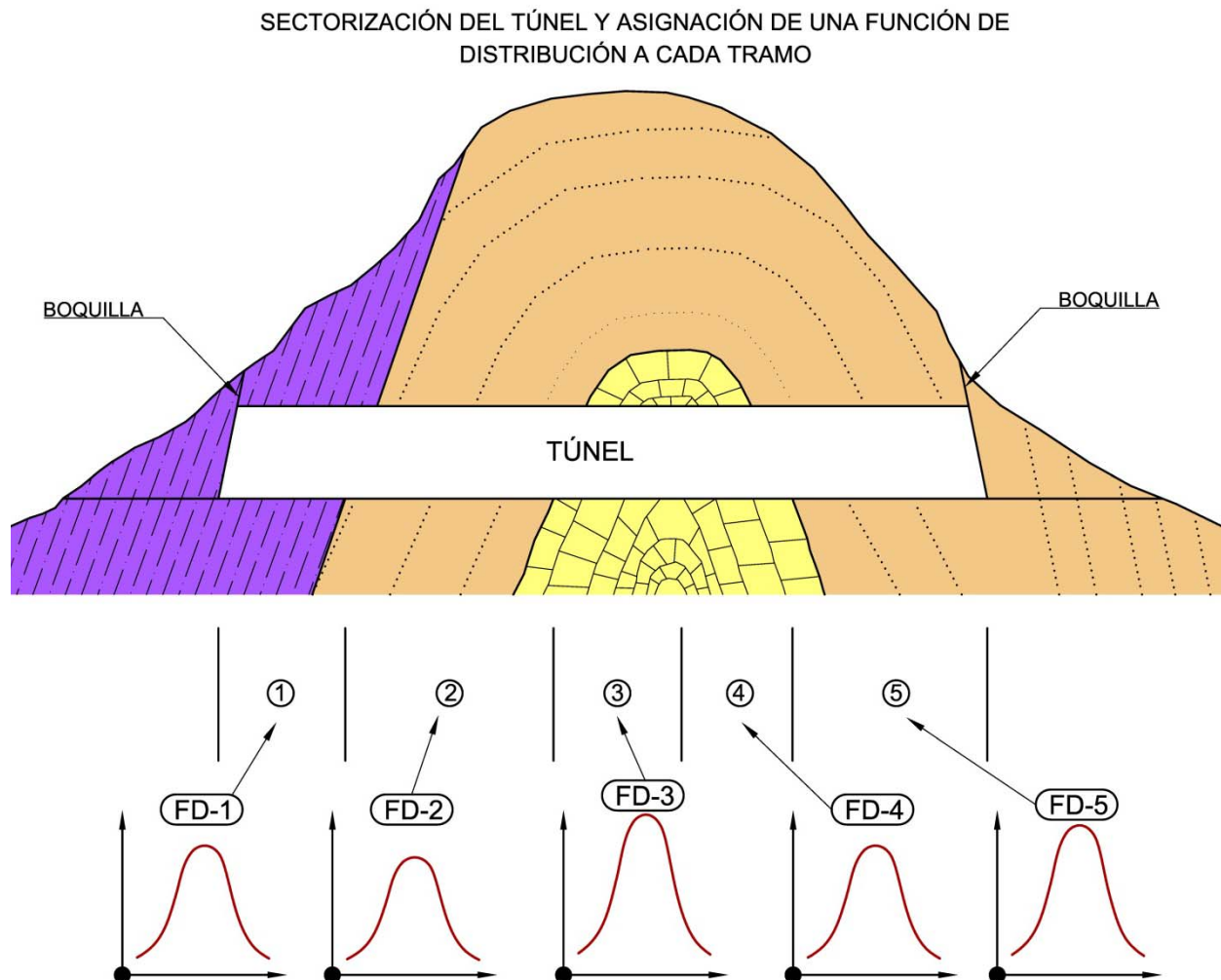


FIGURA: Sectorización del túnel, asignando funciones de distribución del RMR a cada sector

### 3.1.4. SIMULACIÓN BASADA EN LA GENERACIÓN DE NÚMEROS ALEATORIOS

El proceso de simulación se basa en la generación de números aleatorios mediante la técnica del Método Montecarlo o Hipercubo Latino. Los algoritmos de generación de estos números, así como las funciones de distribución son fácilmente desarrollables a partir de hojas de cálculo comerciales.

En cada iteración de generación de números aleatorios se asigna un valor de clasificación geomecánica a cada sector, sobre la base de su probabilidad, descrita por la función de distribución. Cada uno de los valores de clasificación geomecánica obtenidos se asocia a un tipo de

sostenimiento, que a su vez lleva aparejado un coste y un plazo de ejecución. De este modo se genera un punto en un diagrama coste-plazo, de acuerdo a los modelos de Einstein (1996).

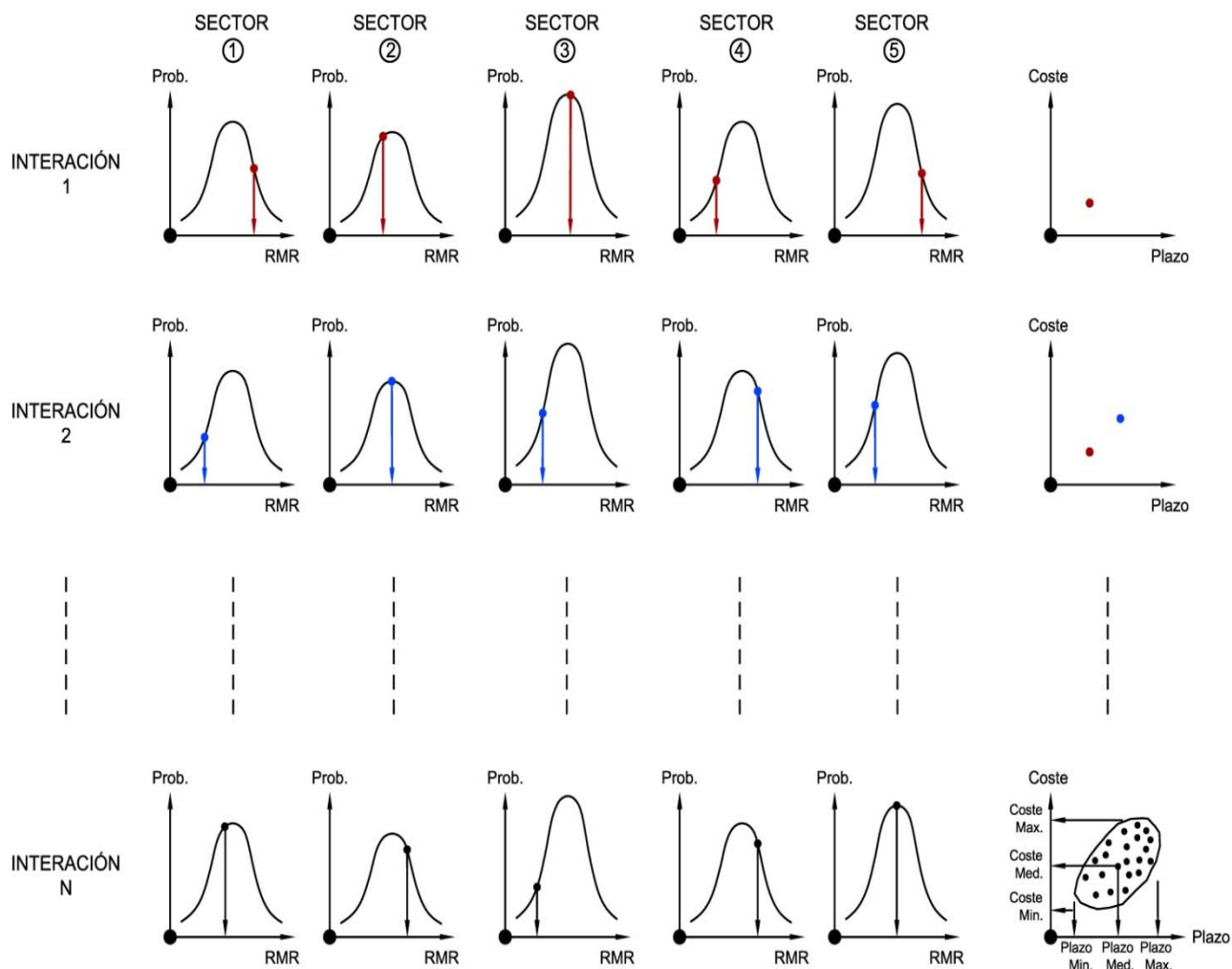


FIGURA: Proceso iterativo para la determinación del diagrama Coste – Plazo de la obra.

La primera iteración asigna un valor de clasificación geomecánica a cada sector. A partir de dicho valor, se asigna a todo el tramo un tipo único de sostenimiento, y el coste y plazo por metro lineal de dicho sostenimiento se multiplica por la longitud del sector, obteniendo el coste y plazo total del sector, asignado en esta primera iteración. Sumando el coste y plazo de cada sector, se obtiene el coste y plazo total del túnel producto de la primera iteración.

Se repite el proceso, realizando sucesivas iteraciones, hasta un total aproximado de  $N = 1000$ . Se obtiene como resultado final una nube de puntos, que permite obtener el plazo y coste medio esperable, así como los máximos y mínimos con un intervalo de confianza prefijado.

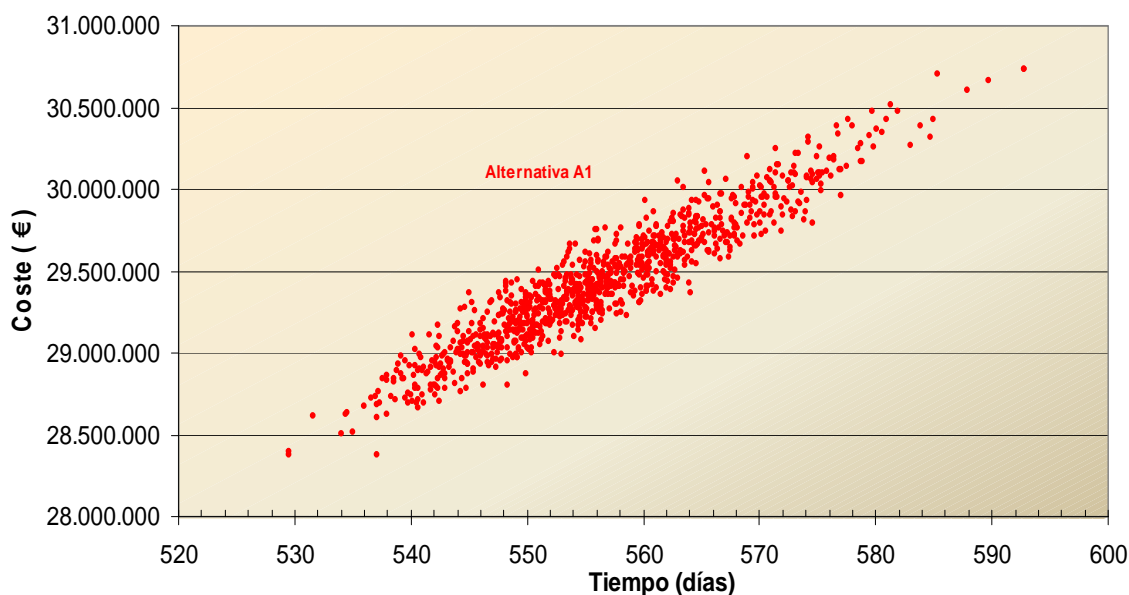


FIGURA: Diagrama Coste – Plazo obtenido como resultado final del proceso.

Alternativa A 1	Plazo (días)	Coste (€)
Media	556	29.426.932
Error típico	0,31	12.012
Mediana	555	29.398617
Desviación estándar	9,9	379.856
Varianza	98	
Curtosis	0,02	0,09
Coef. Asimetría	0,39	0,35
Rango	63	235.927
Mínimo	529	28.379427
Máximo	592	30.736.354
95%	574	30.096.675
5%	541	28.844.260

TABLA: Estadísticas del análisis



### 3.2. ANÁLISIS DE LOS RIESGOS EXCEPCIONALES

Como se ha mencionado, el análisis de los riesgos excepcionales se aborda mediante los procedimientos de determinación de probabilidades asociados a las Cadenas de Markov. Se requiere realizar previamente una evaluación de la probabilidad de que acontezcan sucesos excepcionales (presencia de fallas, cuevas, etc.) en cada túnel y entorno geológico concreto.

La evaluación de probabilidad debe ser específica para cada túnel, basada en el conocimiento geológico del mismo.

Por ejemplo, en un determinado túnel de 1.000 m de longitud, se espera la presencia de cuevas de tamaño mayor de 15 m, ya que los sondeos realizados las han interceptado. Si se han realizado 5.000 m de sondeos y se han detectado dos cuevas de 15 metros, la probabilidad de que aparezcan cuevas de dicho tamaño a lo largo de la excavación del túnel puede cifrarse, de modo simplificado, en  $P = (2 \times 15) / 5.000 = 0,006$ .

Definiendo el escenario de aparición de una primera cueva, puede valorarse en plazo que llevará atravesarla y el coste que supondrá. En esta evaluación deben considerarse todos los factores de un modo realista:

- Debe considerarse que la aparición de la cueva sorprende al equipo de obra, y que no dispone de medios para atravesarla. Hay que valorar el tiempo que dichos medios tardan en emplazarse en obra.
- Hay que considerar que el equipo de ingeniería de obra tarda un determinado tiempo en definir el método más apropiado para atravesar la cueva.
- Hay que tener en consideración que una vez que se ha definido la solución y se dispone de los medios para abordarla, los trabajos iniciales se desarrollan con cierta lentitud, y que el ritmo mejora progresivamente.

Siguiendo estas consideraciones se llega a determinar un coste y plazo para atravesar la primera cueva.

Se aborda entonces la valoración costes y plazos de atravesar las siguientes cuevas, empleando la Teoría de las Cadenas de Markov, que permiten reducir la valoración de los costes y plazos que supone la aparición de nuevas cuevas.

De este modo se puede acotar, por anticipado, las desviaciones en coste y plazo que pueden suponer la aparición de cuevas no detectadas.

#### 4. BIBLIOGRAFÍA

- **H. Einstein (1996).** Decisions aids for tunneling. Tunnel Boring Machines. Trends in Design and Construction of Mechanized Tunnelling. Ed. Balkema Rotterdam, Netherland.
- **T. Isaksson (2002).** Model for estimation of time and cost based on risk evaluation applied on tunnel projects. *Doctoral Thesis. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.*
- **G.S. Kalamaras (1996).** A probabilistic approach to rock engineering design: Application to tunneling. Milestones in Rock Engineering. Ed. Balkema. Rotterdam, Netherland.



