

# **Determinación de métricas de productividad en la excavación subterránea del P.H.Toro 3**



# Abstract

The construction of underground works for hydroelectric power generation requires a series of activities should be planned in advance. A way for planning is the use of historical data on the different activities.

The data collection process in this type of work requires a lot of time, therefore money, which should be maximized to contribute to this effort and future projects with the use of labor, materials and equipment.

The intent of this project is to determine actual yields using a statistical model based on a normal distribution of the activities that can be applied to future underground projects similar to the one. This basically covers digging two wells and a tunnel through manual methods.

The model covers the complete cycle in each work and is based on activities that the developing company takes to measure the efficiency of workers and equipment.

**Keywords:** tunnel, well, yields, underground construction, hydroelectric projects.

# Resumen

La construcción de obras subterráneas para la generación de energía hidroeléctrica, requiere de una serie de actividades que deben de ser planeadas con anticipación. Una manera correcta es el uso de datos históricos sobre las diferentes actividades.

La recolección de datos de los procesos en este tipo de obras necesita gran cantidad de tiempo, por ende dinero, lo que debería de ser aprovechado al máximo este esfuerzo y poder contribuir en futuros proyectos en el aprovechamiento de mano de obra, materiales y equipo.

La intención de este proyecto ha sido determinar rendimientos reales mediante un modelo estadístico, basado en una distribución normal de las actividades, que puedan ser aplicadas al futuro en obras subterráneas en proyectos similares al que se utilizó. Este comprendió la excavación de dos pozos y un túnel de conducción mediante métodos manuales.

El modelo abarcó el ciclo completo en cada obra y fue realizado con base en las actividades que la desarrolladora tomó para medir la eficiencia de trabajadores y equipos.

**Palabras clave:** túnel, pozo, rendimientos, obras subterráneas, proyectos hidroeléctricos.

# **Determinación de métricas de productividad en la excavación subterránea del P.H.Toro 3**

SOFÍA ISABEL CAMPOS GODÍNEZ

Proyecto final de graduación para optar por el grado de  
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Julio del 2012

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

# Contenido

Prefacio .....	1
Resumen ejecutivo .....	2
Introducción .....	4
Marco teórico.....	5
Metodología.....	14
Resultados .....	15
Análisis de los resultados.....	44
Conclusiones .....	50
Recomendaciones .....	51
Apéndices.....	52
Anexos .....	53
Referencias .....	54

# Prefacio

Costa Rica, al ser un país con una cobertura de electrificación bastante alta, igualmente debe de satisfacer la demanda de esta mediante la creación de proyectos de generación eléctrica. Esta generación se ha logrado gracias a la construcción de proyectos hidroeléctricos, los cuales comprenden un alto porcentaje (alrededor del 70%) de la capacidad instalada en el país, pero mantiene un alto porcentaje de explotación aún no desarrollado. Por lo tanto, es necesario ampliar el desarrollo de este tipo de proyectos

Para un buen desarrollo de procedimientos de construcción, se debe de tener en cuenta experiencias pasadas y así mejorar prácticas futuras, teniendo en consideración que cada proyecto en sí es único debido a sus necesidades, por lo que para usar como base proyectos pasados, estos deben de compartir al menos las características básicas con el mismo a desarrollar, tales como tipo de represa, sección y longitud de túnel, tipo de casa de máquinas, tipo de restitución o algún otro frente de trabajo en específico.

El modelo que se va a desarrollar es aplicable únicamente a obras subterráneas del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), por lo que se pretende que sirva de base en pozos y túneles que sean parecidos o similares a los del alcance de este proyecto. Además se determinaron los rendimientos reales de las actividades basados específicamente en una distribución normal de los datos y con un índice de confiabilidad bastante cercano.

Entre las actividades a cubrir para cada obra se encuentran las de acomodo de equipo, barrenación, carga, conexión y voladura, escombros, transporte de material de desecho y soporte necesario para cada sección, es decir todas las actividades que comprenden un ciclo de excavación subterránea.

El modelo a desarrollar es basado en procedimientos manuales y en aquellos en que no es empleado ningún tipo de máquina ya sea rozadora, perforadora mecánica o tuneladora a sección completa. También la excavación se ha realizado sin empleo de bancos para el avance del tope, ya que las áreas transversales son de una dimensión en las cuales se puede trabajar a sección completa.

Se pretende que la información que se obtiene sea lo más verídica y eficaz para la presentación de labores del proyecto, así como una base confiable para otros proyectos a desarrollar en el futuro.

Agradeciendo al ingeniero Dennier Chávez Garro facilitador del tema y los datos del proyecto, guía también en los procedimientos, a don Álvaro Mata técnico de obras y un gran guía en campo. Agradezco también a mi profesor guía el ingeniero geólogo Oldemar Ramírez Escribano, no solamente en el desarrollo del proyecto de graduación con sus comentarios, sugerencias y correcciones, sino también en el transcurso de mi carrera universitaria; y en especial agradezco a Dios y mis padres, Rafael y Marisa, quienes han creído en mí en cada momento.

# Resumen ejecutivo

El Instituto Costarricense de Electricidad, debido a la demanda energética del país, continuamente se encuentra programando y desarrollando proyectos hidroeléctricos. Con el objetivo de mejorar cada desarrollo de proyecto futuro, se debe aprender de los proyectos similares con las experiencias presentadas en sus obras, tal es el caso de las obras subterráneas.

El presente informe, pretendió presentar un compendio de las actividades más importantes para cada obra y así se determinaron los valores reales de dichas actividades. Estos fueron basados en tres obras diferentes: un pozo de 5 metros de diámetro y 70 de profundidad, otro pozo de 6 metros de diámetro y 22 metros de profundidad y un túnel de 208,7 metros lineales. Todos estas obras para la conducción de agua del P.H.Toro 3.

Los datos necesarios para el informe fueron obtenidos de la base de datos del ICE y

del Proyecto Hidroeléctrico Toro 3 específicamente.

Mediante la manipulación de estos en una hoja electrónica y el programa de estadística MINITAB 16, se obtuvieron datos representativos de las actividades analizadas y fueron utilizadas como base para la determinación de avances de obra.

Los valores que se obtuvieron corresponden todos a un grupo de datos que siguen una distribución normal de los mismos, por lo que se consideran válidos y representativos para cada actividad analizada. Los mismos fueron obtenidos por medio de un análisis estadístico y un ajuste de normalidad de cada grupo.

Como resultado se obtuvieron los siguientes cuadros resumen:

<b>Cuadro 1. Comparación agrupando las mismas actividades de los tres diferentes frentes de trabajo de excavación de pozos</b>					
Actividad	Unidad	Rendimientos			
		Estimados	Pozo TF Sección Regular	Pozo TF Sección Irregular	Pozo La Flor
Acomodo de equipo para barrenar	min	32,8	15,12	22,22	18,67
Barrenada	min máquina /m	6,02	12,05	22,78	8,19
Sacando equipo para barrenar	min	17,5	10,67	13,06	18,67
Limpieza de huecos	min persona / m	ND	0,46	0,78	0,91
Cargada de explosivos	min persona / kg	13,09	22,28	12,13	4,01
Conexión y voladura	min persona / fulminante	2,67	3,24	2,77	1,06
Tiempo de humo	min	ND	8,05	9,67	6,04
Tiempo de desconche	min	ND	ND	10	ND
Extracción de material	m <sup>3</sup> / min	0,583	0,06	0,07	0,04
Colocación concreto lanzado	min /m <sup>3</sup>	24,3	25,11	34,15	24,53
Barrenado de pernos	min máquina / m	12,05	ND	0,96	ND
Colocación de pernos	min / unidad	1,52	ND	1,68	ND
Colocación de malla electrosoldada	min persona / m <sup>2</sup>	13,91	9,2	21,39	12,72
Colocación de anillo	min / m	7,49	8,95	11,57	8,69

<b>Cuadro 2. Resultados obtenidos de las diferentes actividades de la excavación del Túnel Tubería Forzada</b>					
Actividad	Unidad	Rendimientos			
		Obtenidos	Estimados	Diferencia Absoluta	Diferencia Porcentual (%)
Acomodo de equipo para barrenar	min	12,06	31,70	19,64	61,96
Barrenación	min máquina /m	5,15	2,21	-2,94	133,03
Sacando equipo para barrenar	min	8,95	6,37	-2,58	40,50
Limpieza de huecos	min persona / m	0,35	0,16	-0,19	118,75
Cargada de explosivos	min persona / kg	10,54	7,57	-2,97	39,23
Conexión y voladura	min persona / fulminante	1,41	2,29	0,88	38,43
Tiempo de humo	min	11,14	10,87	-0,27	2,48
Tiempo de desconche	min	ND	10,21	-	-
Extracción	min/m <sup>3</sup>	17,42	ND	-	-
Colocación concreto lanzado	min /m <sup>3</sup>	54,03	29,40	-24,63	83,78
Barrenado de pernos	min máquina / m	ND	4,21	-	-
Colocación de pernos	min / unidad	ND	5,88	-	-
Colocación de malla electrosoldada	min persona / m <sup>2</sup>	12,72	23,04	10,32	44,79
Colocación arcos sin bóveda invertida	min / m	17,06	13,47	-3,59	26,65

Con el análisis de estos datos se obtuvieron resultados confiables para cada diferente frente de trabajo y además se determinaron las actividades de mayor demanda de tiempo en el ciclo de excavación.

# Introducción

Para el desarrollo y buen entendimiento de un proceso constructivo, es necesario contar con cierta experiencia previa en este campo. Los datos históricos constituyen una fuente bastante útil para ser empleada como referencia.

El objetivo principal del presente trabajo es determinar métricas de productividad en las obras subterráneas, que sean confiables y que puedan ser usadas a futuro por otros proyectos que se desarrollen bajo características semejantes.

Estos rendimientos son obtenidos mediante la aplicación de un proceso estadístico y un análisis PERT de los resultados. Los datos utilizados son tomados de las actividades realizadas por el Proyecto Hidroeléctrico Toro 3 del ICE, específicamente de la construcción del Pozo Tubería Forzada, Pozo Aporte La Flor y Túnel Tubería Forzada.

Entre las actividades en estudio se encuentran:

- Acomodo de equipo para barrenar
- Barrenada
- Sacando equipo para barrenar
- Limpieza de huecos
- Cargada de explosivos
- Conexión y voladura
- Tiempo de humo
- Tiempo de desconche
- Extracción de material
- Colocación concreto lanzado
- Barrenado de pernos
- Colocación de malla electrosoldada
- Colocación de anillo (pozos)
- Colocación de arco (túnel)

Todas estas actividades se miden según su naturaleza. Por ejemplo, las actividades que involucren maquinaria se determinan por el tiempo empleado en cada máquina. Todas las actividades mantienen como factor común la unidad de tiempo. El tiempo es ideal para medir productividades y mantener un patrón entre todas las actividades.

Previamente se han realizado estudios y proyectos para la determinación de costos en obras subterráneas, más no basados en modelos estadísticos, sino que tomados los datos de las actividades en cuanto tiempo y cantidades, y se le asignan un costo a cada uno y se determina el precio por obra finalizada. El presente proyecto pretende más bien ser una base de rendimientos reales y no de costos de obras subterráneas. Es decir, los datos obtenidos puedan ser utilizados en la planeación y control de futuros frentes de trabajo.

# Marco teórico

Desde épocas antiguas, el hombre ha acudido a las excavaciones subterráneas para diferentes propósitos, ya sean para tumbas reales en el Antiguo Egipto, mediante la construcción de pozos y túneles en sus cámaras mortuorias o también para transportar agua potable, como en Asiria, Persia, Mesopotamia y China. Otro ejemplo, es el uso de túneles con funciones hidráulicas en el caso de los romanos o hasta para atravesar una montaña como en Nápoles alrededor del año 36 a.C., el cual permitía el paso de una carretera con un carril en dos sentidos.

Según A.Tapia<sup>1</sup> la clasificación de los túneles según su función es:

- a. Transporte
  - I. De personas y mercancías
    - Carreteras
    - Líneas del ferrocarril
    - Líneas de transporte urbano (Metro)
    - Pasos para peatones
    - Pasos para ciclistas
  - II. De agua
    - Canales
    - Abastecimiento urbano
    - Para riego
    - Centrales hidroeléctricas
    - Agua de enfriamiento en centrales térmicas y nucleares
  - III. En sistemas de alcantarillado
  - IV. Para servicios de cables y tuberías
- b. Almacenamiento
  - I. De petróleo
  - II. De residuos radioactivos
  - III. De materiales para uso militares
  - IV. Embalses subterráneos

- c. Instalaciones
  - I. Centrales energéticas
  - II. Estacionamiento de vehículos
  - III. Depuradoras de aguas residuales
- d. Científica
- e. Protección
  - I. Refugios
  - II. Puestos de control

También se pueden clasificar los túneles por diferentes características<sup>2</sup> como:

- a. Profundidad
  - I. Subsuperficiales. Si la cobertura no supera 50 m.
  - II. Poco profundos. Si la profundidad se encuentra en 50 y 200 m.
  - III. Medianamente profundos. Cuando la cobertura está entre 200 y 500.
  - IV. Profundos. Construidos con coberturas de 500 a 1000 m.
  - V. Muy profundos. Cuando las profundidades de construcción supera 1000 m.
- b. Longitud
  - I. Cortos. Si la longitud no supera 500 m.
  - II. Medianos. Si la longitud se encuentra en el rango de 500 a 2000 m.
  - III. Largos. Cuando la longitud tiene entre 2 y 5 km.
  - IV. Muy largos. Si la longitud supera 5 km.

---

<sup>1</sup> Topografía subterránea.

---

<sup>2</sup> Túneles Viales

- c. Centro poblacional
  - I. Rural. Si este se encuentra fuera de cascos urbanos
  - II. Urbano. Si se encuentra en una ciudad
- d. Según el material donde se construye
  - I. En roca
  - II. En suelo

2

## Métodos de excavación de obras subterráneas

### Excavación Convencional

#### Perforación y Voladura<sup>3</sup>

Es el método más utilizado para túneles en roca. Es aplicado cuando la roca es muy abrasiva y muy resistente o se encuentra en estado masivo. Ciclo de trabajo de este sistema:



Figura 1. Ciclo de Perforación y Voladura

#### Paso 1

Mediante máquinas barrenadoras como “jumbos” para túneles de secciones transversales de tamaño considerable. Si por el contrario, el espacio es más confinado se usan martillos manuales de aire comprimido, aunque sus

rendimientos son menores que los jumbo y se requiere mucha mano de obra. Estos funcionan a percusión, es decir, el barreno golpea contra la roca y gira de forma discontinua entre cada percusión, separándose del fondo del taladro.

#### Paso 2

Los agujeros perforados se llenan con el explosivo. Esto se hace por trabajadores de pie sobre el suelo y, si la sección es muy alta, se utiliza otro jumbo con barras flotantes para levantar al trabajador o también mediante andenes temporales.

La carga se puede hacer utilizando explosivos de cartucho, conocidos como polvo palo o dinamita, o también se puede hacer uso de explosivos a granel. Este material granular, comúnmente nitrato de amonio y aceite combustible, son introducidos en cada uno de estos hoyos y se coloca un detonador en cada uno; luego todos son conectados al cordón detonante.

#### Paso 3

La carga es disparada y la explosión en secuencia se completa en varios milisegundos.

Después de la explosión el polvo de roca y los gases se mantienen en el frente del túnel, por lo que se ha colocado previamente un ducto de ventilación, suspendido de la corona del túnel, el cual suministra aire fresco que golpea el frente de la excavación y así el polvo de roca y los gases son desplazados hacia afuera.

#### Paso 4

Todo el material suelto generado por la voladura es acarreado mediante maquinaria sobre llantas o mecanismos de bandas transportadoras para liberar el tope del túnel de los residuos y proveer de una zona de trabajo accesible para el siguiente ciclo.

#### Paso 5

Las zonas del frente de trabajo que no queden aptas para un proceso de estabilización correcto o que tengan sobrantes para completar la sección deseada, son removidas manualmente.

<sup>3</sup> Túneles

#### Paso 6

Se pueden utilizar pernos en la superficie del túnel como método para la estabilización de paredes. Bajo las condiciones más pobres de terreno, desde el punto de vista de su condición física, puede ser necesario colocar arcos de acero para sostener las paredes y el techo de un túnel. En otras situaciones, una malla de acero puede evitar que otros materiales sueltos de las paredes y el techo caigan sobre los trabajadores que se encuentran en niveles inferiores de la sección.

#### Paso 7

De ser necesario, se recurre a un replanteo de la dirección del túnel mediante equipo topográfico. En caso de mantenerse la dirección, se utilizan puntos guía para continuar con el siguiente ciclo.

### **Cut and Cover<sup>4</sup>**

Este método consiste en excavar una zanja en el suelo y luego cubrirla con material de relleno para restaurar la calzada original. Debe ser casi siempre necesario un sistema de apoyo para poder soportar el material usado para cubrir el túnel, tal como concreto lanzado.

#### Método de abajo hacia arriba

También llamado método de "caisson" (cajón de pared). Una plataforma de perforación es utilizada para instalar paredes temporales en el borde del túnel, luego se excava la zanja hasta el lecho de roca, una vez alcanzada la profundidad deseada se cola el suelo del túnel y las paredes desde abajo hacia arriba.

Una vez completadas las paredes se construye el techo y se restaura la parte superficial.

#### Método de arriba hacia abajo

Una excavadora de zanjas se utiliza para cavar en la tierra y crear una pared con mezcla de suspensión, es decir, una pared de lechada.

La pared suspensión proporciona soporte temporal a los lados de la zanja y luego el concreto se vierte para una estructura de pared

---

<sup>4</sup> Cut-and-cover tunnels

permanente. Una vez que las paredes de concreto del túnel se han completado, se construye el techo del túnel y se restaura la superficie.

La excavación del túnel se lleva a cabo entonces a través de aberturas en el techo del túnel de arriba hacia abajo al piso del túnel o por los extremos del mismo. La losa de piso del túnel es la última parte del túnel que se construye.

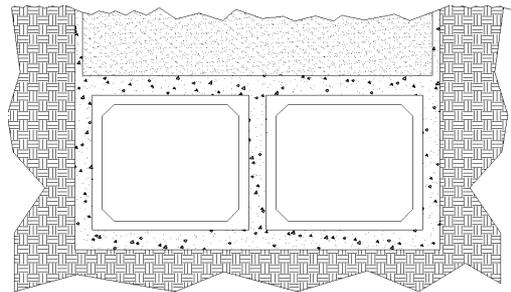


Figura 2. Esquema de "Cut and Cover"

### **Convencional Mecanizada**

En este tipo de excavaciones es la que se avanza con máquinas rozadoras, con excavadoras, generalmente hidráulica - brazo con martillo pesado o con cuchara (sea de tipo frontal o retro), con tractores y cargadores e incluso, con herramientas de mano, generalmente hidráulicas o eléctricas.

Este mecanismo de excavación puede ser a sección completa o sección parcial.

### **Excavación Mecanizada<sup>5</sup>**

**Tunnel Boring Machine (TBM)**, o máquina perforadora de túneles, también conocida como minador a sección completa. Es una máquina que puede excavar túneles a sección completa y a la vez colabora con el sostenimiento necesario colocándolo ya sea de forma provisional o definitiva.

La excavación es realizada por medio de una cabeza giratoria que se encuentra equipada con elementos de corte y son accionados por motores hidráulicos. El empuje para adelantar se

---

<sup>5</sup> Tunnel Boring Machines

permite por las zapatas móviles (grippers) accionado por mecanismos hidráulicos, los cuales se empujan contra un punto fijo en la pared del túnel.

Estas máquinas tuneladoras por medio de bandas transportadoras trasladan el material residual de los discos de corte hasta el final de la misma. Se distinguen dos tipos:

**Topos:** las que son máquinas diseñadas para excavación en suelos rocosos duros o de mediana resistencia.

**Escudos:** estas son diseñadas para excavar suelos o rocas blandas ya que necesitan la colocación de un sostenimiento sistemático.

## Filosofía NATM<sup>6</sup>

El NATM (The New Austrian Tunneling Method) fue desarrollado en Austria entre los años 1957 y 1965, y se le puso este nombre para que se distinguiera del llamado método tradicional. Sus principales colaboradores en su desarrollo fueron L Von Rabcewicz, L Muller y F Pacher.

Al haberse traducido la palabra "método" al inglés, ha llevado a confusiones en su entendimiento. Se debe de tomar el NATM como una filosofía de diseño o concepción de diseño del soporte y no se debe pensar como un método de construcción de túneles o un tipo de sostenimiento en particular.

Se basa en la adaptación de determinados principios en la secuencia de trabajo involucrando la excavación y el soporte, para que la masa rocosa que se encuentra alrededor de la excavación se convierta en el principal elemento de soporte de un túnel.

Los tipos de elementos principales de soporte en la aplicación del NATM son el concreto lanzado y los pernos anclados. El concreto se pega a casi cualquiera de los tipos de roca, con solamente una delgada capa de este actúa como material de adherencia y esfuerzo para la superficie de propiedades físicas menores. Cuando se encuentre en arcillas expansivas o roca de alto grado de trituración, el uso de malla electrosoldada y concreto lanzado son aplicados como un medio adecuado de estabilización, ya que presentan una casi ilimitada resistencia a la tracción.

---

<sup>6</sup> Proyecto y construcción de túneles

## Diseño de voladuras subterráneas en roca<sup>7</sup>

En una voladura de banco se pueden encontrar una o varias caras libres paralelas a la dirección de la barrenación y hacia las cuales se hace la voladura.

Por otro lado, en un túnel, la cara única cara libre que se encuentra (tope) es perpendicular a la dirección en que entraron los barrenos, por lo cual es necesario crear una nueva cara libre hacia la cual se debe dirigir la voladura. Esta segunda cara libre puede ser producida por medio de un corte con huecos paralelos, un corte en V, un corte en abanico o cualquier otro medio para abrir la cara del túnel.

Luego de hecho el corte, la voladura se hace hacia esta cara libre y puede ser comparada con una voladura de banco.

Los huecos del contorno (techo, piso y paredes) deben de tener un cierto ángulo de inclinación para que el túnel mantenga su área de diseño. Esta debe de ser lo suficiente para acomodar las máquinas barrenadoras en el siguiente ciclo. La desviación se debe mantener alrededor de los  $10 \pm 3$  cm/m de profundidad del hueco.

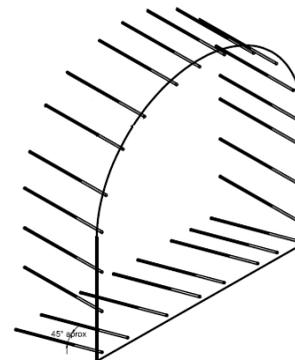


Figura 3. Esquema de barrenación de huecos de techo, pared y piso

---

<sup>7</sup> Voladuras de rocas

### El corte

También denominado “Cuele”. El corte actúa como una nueva cara libre haciendo que los demás huecos que se realizaron fueran paralelos a este y así la voladura es dirigida hacia este hueco vacío. Normalmente se localiza en el medio de la sección transversal del túnel sobre la primera fila de ayudantes del piso y así se obtiene un buen movimiento hacia adelante y una pila de escombros centrada.

El diámetro del corte es directamente proporcional a la profundidad de barrenación, por lo que un avance corto se puede atribuir a un hueco vacío muy pequeño en relación con su profundidad.

### El contorno

Este se encuentra dividido en huecos de piso, de pared y de techo. Los huecos de piso se cargan más con explosivos que los otros para compensar el efecto de la gravedad y el peso del material, que se encuentra encima del resto de la voladura que se posan sobre ellas en el instante de la detonación.

Se utiliza la técnica de voladura suave en la cual se perforan los huecos del contorno bastante cerca unos de otros, con lo que se logran superficies más estables, menor sobrecavación y fisuramiento de la roca, con lo que conlleva a un menor revestimiento de acero de refuerzo y de inyecciones, si fueran necesarias.

Se debe tomar en cuenta los huecos adyacentes a los huecos del perímetro ya que si tienen una carga muy pesada, la formación de grietas puede extenderse más allá del contorno final.

### Secuencia de disparo

Esta debe ser diseñada de forma tal que cada hueco tenga rotura libre. Es de importancia en la voladura de túneles que el tiempo de retardo entre los huecos sea lo suficientemente largo para que permita la rotura y el lanzamiento de la roca a través de la abertura estrecha del hueco vacío.

En los huecos del contorno, la dispersión en el retardo entre los huecos se debe de tratar de ser pequeña para obtener el efecto de voladura suave. El techo debe de volarse con el

tercero más alto de la serie, las paredes con uno más bajo y el piso con el segundo más alto de la serie, dejando al final las esquinas con el período más alto.

## Métodos de extracción

Una extracción de escombros y su transporte eficiente reduce la duración de un ciclo de trabajo, y en sí, el costo de la obra; por lo que la remoción rápida del escombro es esencial para iniciar las labores del sostenimiento.

El sistema a utilizar depende en gran cantidad del volumen del material a transportar y de la distancia de acarreo. En túneles carreteros, debido a las secciones tan grandes, el volumen de escombros es bastante, por lo que no se suelen utilizar cintas transportadoras o vagones sobre vías, sino es recomendable utilizar maquinaria sobre neumáticos.

En función de la distancia se puede utilizar los siguientes métodos:

**Palas cargadoras frontales de perfil bajo:** Se utilizan cuando las distancias son cortas, es decir, inferiores a los 500 metros y los túneles son de sección pequeña o mediana. Para distancias más largas, se crean zonas de acopio intermedio de escombros. La capacidad de estas palas es de alrededor de los 3 m<sup>3</sup>.



Ilustración 1. Pala cargadora frontal de bajo perfil

**Palas cargadoras + Vagonetas:** Se utilizan cuando las distancias de acarreo son mayores a los 500 metros en túneles de gran sección (mayores a 70 m<sup>2</sup>). Una pala cargadora sobre llantas carga las vagonetas o “dumpers” que saca el escombro del túnel. Si la distancia es muy

larga, se permiten zonas de ensanche para que dos camiones puedan pasar al mismo tiempo.



Ilustración 2. Dumpers utilizados para extracción de escombros.

**Vagones sobre vías:** Se utilizan cuando las distancias de acarreo son superiores a los 1500 metros y son túneles de secciones medianas.

## Determinación del soporte

Para determinar un tipo de soporte se debe saber previamente qué tipo de macizo rocoso o suelo estamos atravesando, por lo que se establecen sistemas de caracterización de rocas:

### Sistema de clasificación RQD<sup>8</sup>

Se puede definir como el Índice de Calidad de Roca, el cual fue propuesto por D.U. Deere en 1964, en el cual se puede definir como un índice cuantitativo de la calidad de la roca, basándose en la extracción de núcleos con perforaciones de diamante.

Su nombre en inglés “Rock Quality Designation” RQD y es utilizado a nivel mundial por su comprobada utilidad en la clasificación del macizo rocoso para una selección adecuada del reforzamiento del túnel. El RQD se puede definir como el porcentaje de núcleos que se recuperaron de 100 mm o más del largo total del barreno:

$$RQD (\%) = \frac{\text{Longitud de los núcleos de testigo} > 100 \text{ mm}}{\text{Longitud total del barreno}} \times 100$$

<sup>8</sup> Excavaciones subterráneas en roca

Según D.U.Deere, se propone la siguiente relación entre el porcentaje RQD y la calidad de la roca.

Cuadro 3. Clasificación de la calidad del macizo rocoso según índice RQD	
RQD %	Calidad de roca
< 25%	Muy mala
25-50%	Mala
50-75%	Regular
75-90%	Buena
90-100%	Muy buena

Cabe mencionar que varios expertos han mencionado que este sistema tiene una debilidad “...en el caso de que hayan fracturas con rellenos de arcilla o de material meteorizado. Este caso puede presentarse cerca de la superficie donde la meteorización o las infiltraciones hayan producido arcilla, lo que reduce la resistencia a la fricción a lo largo de los planos de fractura. Esto generará una roca inestable aún si las fisuras están muy separadas una de otra y el valor de RQD es alto.”

### Sistema de clasificación RMR

El RMR “Rock Mass Rating” es un sistema propuesto por Z. T. Bieniawski y es uno de los métodos más utilizados para clasificación de macizos rocosos que toma en cuenta:

- Resistencia compresiva de la roca inalterada.
- Índice de la Calidad de la Roca (RQD).
- Espaciamiento de fisuras (juntas).
- El estado de estas fisuras.
- Presencia de agua.
- Corrección por orientación.

La suma de todos estos factores nos da el Índice de calidad RMR que varía entre 0 – 100. Los objetivos de la clasificación son:

- Determinar y/o estimar la calidad del macizo rocoso.
- Dividir el macizo en grupos de comportamiento similar.
- Proporcionar una base para el entendimiento de las características del macizo.
- Facilitar la planeación y diseño de estructuras en la roca, al proporcionar

datos cuantitativos para soluciones que sean necesarios en problemas reales de ingeniería.

El RMR se basa en dar un peso (porcentaje) a cada parámetro, dándole su máximo valor al macizo rocoso de mejor comportamiento, de la siguiente manera:

- Resistencia a la roca – 15%
- RQD – 20%
- Espaciado de juntas – 30%
- Condición de juntas – 25%
- Aguas subterráneas – 10%

### Sistema de clasificación Barton

Basado en el Índice de Calidad “Q”, o también llamado *Índice de Calidad Tunelera*, y está definido por:

$$Q = \frac{RQD}{J_v} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Donde:

RQD = Índice de Calidad de Roca. Rock Quality Designation (Deere)

$J_n$  = Índice de diaclasado que toma en cuenta el número de familias. Joint Set Number.

$J_r$  = Índice de rugosidad de las juntas. Joint Roughness Number.

$J_a$  = Índice de alteración de las juntas. Joint Alteration Number.

$J_w$  = Factor de reducción por presencia de agua en las juntas. Joint Water Reduction Factor.

SRF = Factor de reducción por esfuerzos. Stress Reduction Factor.

Por lo que:

$RQD/J_n$  se refiere al tamaño de los bloques. Representa la estructura global del macizo.

$J_r/J_a$  relaciona la resistencia al corte entre bloques.

$J_w/SRF$  incluye en la ecuación el estado tensional en el macizo rocoso.

De los anteriores sistemas, el sistema RMR y el sistema “Q” son de especial interés, ya que estos incluyen un gran número de datos para poder evaluar correctamente todos los factores que tienen influencia sobre el macizo rocoso en el que se encuentre la excavación subterránea.

Sin embargo, para la estimación de ademes en obras subterráneas, algunos autores recomiendan el siguiente procedimiento:

1. Clasifique el macizo rocoso, durante las pruebas de exploración, preferiblemente por todos los sistemas posibles.
2. Cada sistema recomienda un ademe, por lo que se puede hacer una evaluación preliminar con base en estos.
3. Estimar las condiciones de esfuerzos “in situ” con base en mediciones de esfuerzos que se hayan realizado en el lugar o en sitios cercanos.
4. Estimar esfuerzos máximos en la periferia de la roca que rodea la excavación propuesta.
5. En caso de encontrarse esfuerzos de tensión en la periferia, referirse a la literatura para plantear el mecanismo de excavación más adecuado.
6. Si no hay más que esfuerzos de compresión, calcular el esfuerzo máximo de la periferia y del esfuerzo in situ del paso 3, se compara con la resistencia a la compresión no confinada del macizo rocoso. Si el esfuerzo de la periferia no rebasa la resistencia a la compresión no confinada del macizo, se debe efectuar un análisis más detallado.
7. Sin importar los resultados en los pasos 5 y 6 se debe utilizar cualquier dato geológico obtenido para examinar la posibilidad de formación de cuñas y bloques por medio de las técnicas de estereografía. En caso de que se vayan a presentar debilitamientos se debe prever y determinar la resistencia de las anclas o cables que se necesiten para estabilizar la excavación.
8. Tomar en cuenta todos estos análisis y las consecuencias de la secuencia de la excavación y las posibles variaciones en el orden de la instalación de ademes.
9. Si se usan anclas para el refuerzo, verificar que las diversas necesidades no entran en conflicto una con otra.
10. Una vez realizadas las estimaciones pertinentes, se debe dibujar la sección transversal del tipo de excavación y colocar en este una distribución aproximada de los fenómenos estructurales, sistema de refuerzo y verificar si hay suficiente espacio para

barrenar, colocar anclas y colocar concreto.

Además de estos procedimientos, un factor utilizado en la determinación del tipo de soporte, es la experiencia del diseñador, el cual se ha convertido probablemente en el más importante en la práctica.

Tipología del soporte temporal (ademes)

1. Roca desnuda (sin ademe, RD)
2. Roca desnuda con pernos de anclaje (P)
3. Roca desnuda con concreto lanzado (CL)
4. Roca desnuda con pernos de anclaje y concreto lanzado (PCL)
5. Roca desnuda con arcos de acero (AA @ separación de arcos)
6. Roca desnuda con arcos de acero y concreto lanzado (AACL @ separación de arcos)

## Análisis Estadístico

### Distribución normal<sup>9</sup>

La distribución normal, distribución de Gauss o distribución gaussiana, es frecuentemente utilizada en las aplicaciones estadísticas, justificada porque ciertos fenómenos tienden frecuentemente a parecerse en su comportamiento a este tipo de distribución.

La exploración visual de un grupo de datos puede sugerir la forma de su distribución, sin embargo, existen otras medidas, gráficos de normalidad o contraste de hipótesis, que pueden ayudar a discernir de un modo más estricto si la muestra corresponde o no a una distribución normal.

Si los datos no corresponden a una distribución normal, se pueden transformar o bien emplear otros métodos para contrastar la hipótesis de normalidad.

La distribución normal de una variable, está determinada por dos parámetros: su media ( $\mu$ ) y su desviación estándar ( $\sigma$ ).

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right\}; \quad -\infty < x < \infty$$

Ecuación 1. Densidad de la normal

<sup>9</sup>Probabilidad y estadística para ingenieros.

### PERT<sup>10</sup>

Del término en inglés "Program Evaluation and Review Technique". El PERT es un método basado en actividades estimadas derivadas de "tres tiempos estimados", llamados, tiempo optimista, tiempo promedio y el tiempo pesimista. La estimación de la media de la duración de la actividad a continuación, se puede calcular como sigue:

$$T_e = \frac{T_o + 4T_m + T_p}{6}$$

Ecuación 2. Cálculo de PERT

Donde:

$T_e$  = Valor medio de la duración de la actividad (esperado).

$T_o$  = Duración optimista de la actividad.

$T_m$  = Duración más probable de la actividad.

$T_p$  = Duración pesimista de la actividad.

Esta ecuación, tiene en cuenta que las estimaciones son ponderadas, con el mayor peso colocado en la estimación de la duración más probable.

### Actividades que se van a analizar

Entre las actividades que se van a analizar en el proyecto se encuentran:

- Acomodo de equipo para barrenar:

Se tomará como unidad de medida el tiempo en minutos que se dura para ubicar el equipo en la zona de trabajo.

- Barrenación:

Se tomará como unidad de medida el tiempo en minutos que dura cada máquina para realizar una perforación. Se procede a tomar el tiempo total empleado en la barrenación por las máquinas utilizadas entre la cantidad de perforaciones realizadas y la longitud realizada en cada perforación.

<sup>10</sup>Construction planning and scheduling.

- Sacando equipo para barrenar:  
Se tomará como unidad de medida el tiempo en minutos que se dura para desmontar y ubicar el equipo que se utilizó en la zona de trabajo.

- Limpieza de huecos:  
Se tomará como unidad de medida el tiempo en minutos que se dura para limpiar los huecos barrenados previos a la carga, por lo que se toma la cantidad de tiempo utilizado en la limpieza por el número de trabajadores entre los huecos perforados por la longitud de cada hueco.

- Cargada de explosivos:  
Se tomará como unidad de medida el tiempo en minutos que se dura con el personal para cargar la totalidad del explosivo. Se procede a tomar el tiempo total empleado en el sitio por la cantidad de personas entre el peso total en kilogramos del explosivo utilizado.

- Conexión y voladura:  
Se tomará como unidad de medida el tiempo en minutos que se durará una persona para conectar los fulminantes y realizar la voladura. Se procede a tomar el tiempo total empleado en el sitio por las personas a cargo de la conexión por la cantidad de personas entre la cantidad de fulminantes utilizados.

- Tiempo de humo:  
Se tomará como unidad de medida el tiempo en minutos que se da para que salga el humo producto de las explosiones.

- Tiempo de desconche:  
Se tomará como unidad de medida el tiempo en minutos que se tome en alisar o arreglar las imperfecciones en el borde de la sección.

- Extracción de material:  
Se tomará como unidad de medida la cantidad de material que se extraído entre el tiempo en minutos que se dura extrayendo el material.

- Colocación concreto lanzado:  
Se tomará como unidad de medida el tiempo empleado para colocar un metro cúbico de concreto lanzado en el sitio.

- Barrenado de pernos:  
Se tomará como unidad de medida el tiempo empleado para barrenar un metro lineal por cada máquina empleada.

- Colocación de pernos:  
Se tomará como unidad de medida el tiempo empleado para colocar un metro lineal de un perno por trabajador.

- Colocación de malla electrosoldada:  
Se tomará como unidad de medida el tiempo empleado para colocar una metro cuadrado de malla electrosoldada por persona. Se toma los minutos totales empleados por el número de personas colocando la malla entre los metros cuadrados de malla electro soldada colocada.

- Colocación de anillo (pozos):  
Se tomará como unidad de medida el tiempo empleado para colocar un metro lineal de las vigas utilizadas para armar el anillo completo.

- Colocación de arco (túnel):  
Se tomará como unidad de medida el tiempo empleado para colocar un metro lineal de las vigas utilizadas para armar el arco del túnel completo, la corona del túnel y las vigas que la sostiene.

# Metodología

El desarrollo del proyecto se realizó siguiendo el siguiente esquema:

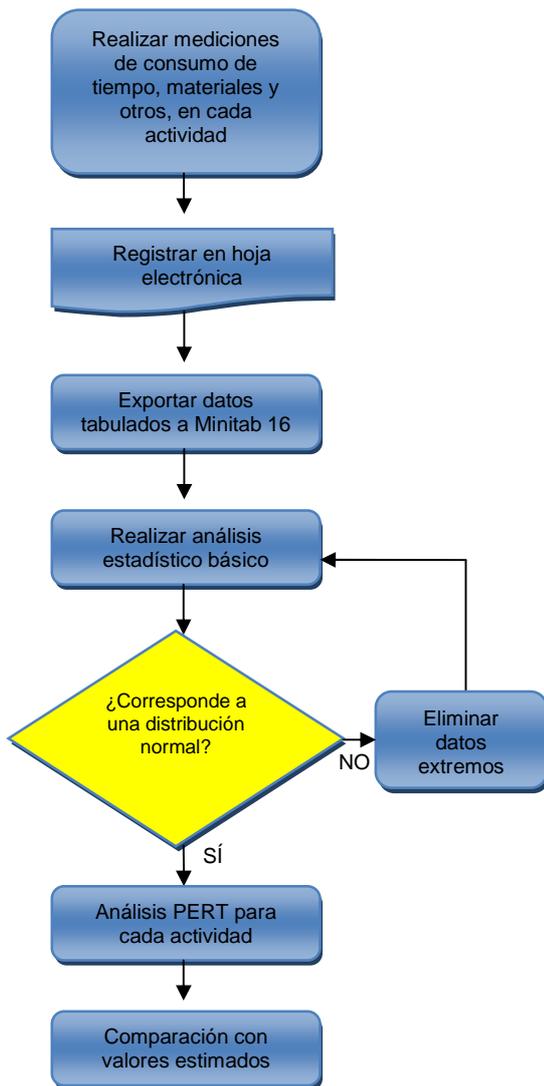


Figura 4. Esquema de metodología empleada.

Los datos se tomaron directamente de la base de datos del P.H.Toro 3 del Instituto Costarricense de Electricidad.

Estos datos tomados de la base fueron debidamente tabulados en una hoja electrónica nueva de Microsoft Excel 2007. Debido a que algunas actividades sí pueden ser tomadas directamente de la base, en algunos casos es necesario un cálculo aritmético entre los datos para su análisis.

Por ejemplo, el tiempo de humo en la base de datos es dado solamente la cantidad de minutos empleados, al igual que es la medida que estaba buscando. Por otro lado, la actividad "barrenación" se debe de tomar para cada ciclo la cantidad de minutos, multiplicarla por la cantidad de máquinas registradas barrenando en ese ciclo y dividirla entre los metros barrenados por cada una.

Seguidamente se exportaron los datos al programa MINITAB 16, el cual realiza un análisis estadístico básico del cual se toman los datos de kurtosis y sesgo estandarizado para determinar si la distribución de los datos es normal o no.

Si la kurtosis o sesgo estandarizado de la actividad presenta valores fuera del intervalo de -2 a 2, se procede a eliminar los datos extremos del conjunto, hasta que ésta se ajuste a la distribución deseada.

Cuando ya se cuenta con una distribución normal de la actividad, se aplica un análisis PERT, el cual consiste en tomar como dato final el resultado del dato menor, el promedio y el dato mayor del conjunto.

Se realiza el mismo procedimiento para cada actividad de cada frente de trabajo y se tabulan los datos en la hoja electrónica para su comparación posterior.

Una vez obtenidos los datos reales de cada actividad, se procede a sacar la diferencia tanto porcentual como absoluta entre el valor obtenido y el valor estimado para la actividad.

# Resultados

## Pozo Tubería Forzada Sección Regular

### Proceso de Barrenación

- Acomodo de equipo para barrenar.
- Barrenación.

Cuadro 4. Resumen Estadístico para Acomodo Equipo (min)	
Conteo Total	27
Promedio	15,19
Mediana	15,00
Desviación Estándar	2,59
Coefficiente de Variación	17,04%
Mínimo	10,00
Máximo	20,00
Rango	10,00
Kurtosis	1,29
Sesgo Estandarizado	1,23
<b>PERT</b>	<b>15,12</b>

Cuadro 5. Resumen Estadístico para Barrenación (min-máquina/m)	
Conteo Total	28
Promedio	11,36
Mediana	10,17
Desviación Estándar	7,27
Coefficiente de Variación	64,06%
Mínimo	2,86
Máximo	30,00
Rango	27,14
Kurtosis	0,17
Sesgo Estandarizado	0,35
<b>PERT</b>	<b>12,05</b>

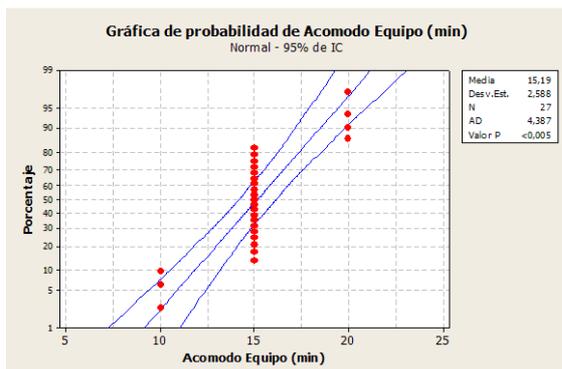


Gráfico 1. Gráfico de Probabilidad Normal – Acomodo Equipo  
Programa: MINITAB 16

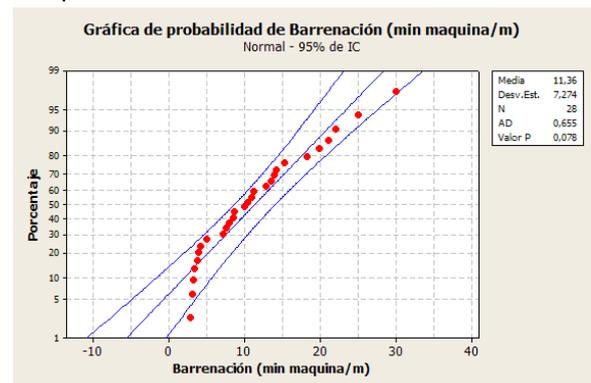


Gráfico 2. Gráfico de Probabilidad Normal – Barrenación  
Programa: MINITAB 16

## Proceso de Carga y Voladura

- Retiro de equipo

Cuadro 6. Resumen Estadístico para Retiro Equipo (min)	
Conteo Total	30
Promedio	11,00
Mediana	10,00
Desviación Estándar	3,32
Coefficiente de Variación	30,20%
Mínimo	5,00
Máximo	15,00
Rango	10,00
Kurtosis	-0,63
Sesgo Estandarizado	-0,28
<b>PERT</b>	<b>10,67</b>

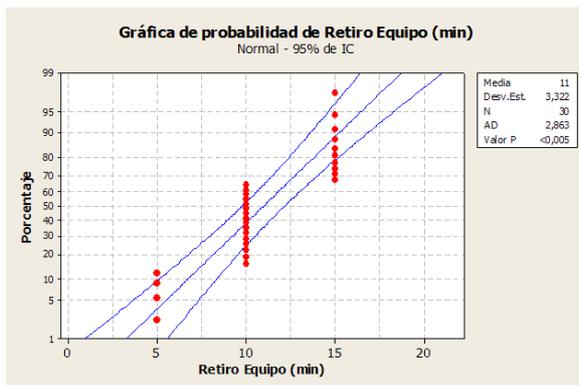


Gráfico 3. Gráfico de Probabilidad Normal – Retiro Equipo  
Programa: MINITAB 16

- Limpieza de huecos

Cuadro 7. Resumen Estadístico para Limpieza de huecos (min-persona/m)	
Conteo Total	7
Promedio	0,47
Mediana	0,45
Desviación Estándar	0,21
Coefficiente de Variación	44,54%
Mínimo	0,17
Máximo	0,71
Rango	0,55
Kurtosis	-1,61
Sesgo Estandarizado	0,92
<b>PERT</b>	<b>0,46</b>

1

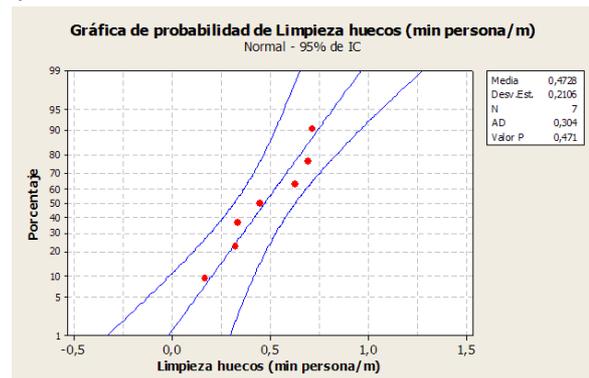


Gráfico 4. Gráfico de Probabilidad Normal – Limpieza de huecos  
Programa: MINITAB 16

- Carga de explosivo

<b>Cuadro 8. Resumen Estadístico para Carga explosivo (min-persona/kg)</b>	
Conteo Total	25
Promedio	21,24
Mediana	18,94
Desviación Estándar	9,78
Coefficiente de Variación	46,05%
Mínimo	5,57
Máximo	43,17
Rango	37,59
Kurtosis	-0,51
Sesgo Estandarizado	-0,62
<b>PERT</b>	<b>22,28</b>

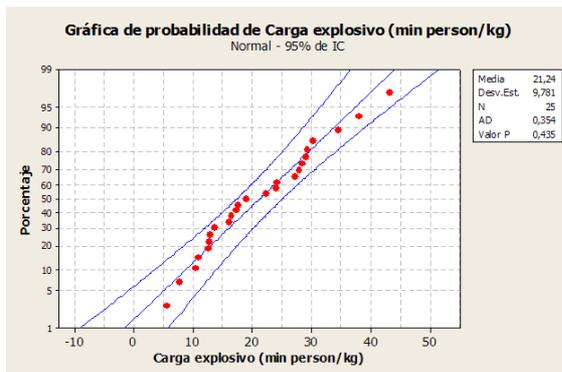


Gráfico 5. Gráfico de Probabilidad Normal – Carga de explosivo  
Programa: MINITAB 16

- Conexión y voladura

<b>Cuadro 9. Resumen Estadístico para Conexión/voladura (min-persona/fulminante)</b>	
Conteo Total	25
Promedio	3,32
Mediana	3,33
Desviación Estándar	0,79
Coefficiente de Variación	23,65%
Mínimo	1,67
Máximo	4,50
Rango	2,83
Kurtosis	-0,56
Sesgo Estandarizado	-0,82
<b>PERT</b>	<b>3,24</b>

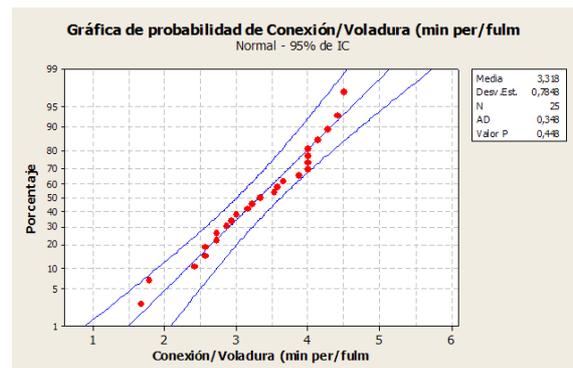


Gráfico 6. Gráfico de Probabilidad Normal – Conexión / Voladura  
Programa: MINITAB 16

- Tiempo de humo

<b>Cuadro 10. Resumen Estadístico para Tiempo de humo (min)</b>	
Conteo Total	30
Promedio	8,33
Mediana	10,00
Desviación Estándar	2,40
Coefficiente de Variación	28,77%
Mínimo	5,00
Máximo	10,00
Rango	5,00
Kurtosis	-1,55
Sesgo Estandarizado	-1,29
<b>PERT</b>	<b>8,05</b>

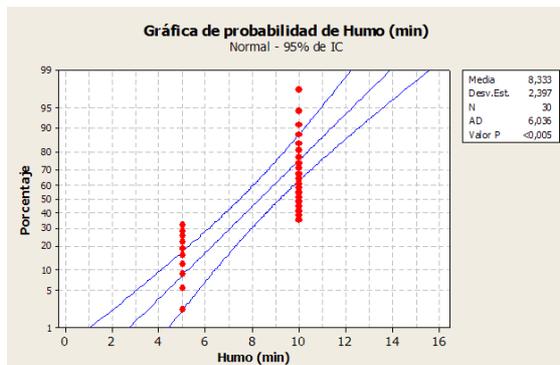


Gráfico 7. Gráfico de Probabilidad Normal – Tiempo de humo  
Programa: MINITAB 16

- Extracción del material

<b>Cuadro 11. Resumen Estadístico para Extracción (m³/min)</b>	
Conteo Total	48
Promedio	0,05
Mediana	0,05
Desviación Estándar	0,02
Coefficiente de Variación	33,30%
Mínimo	0,03
Máximo	0,09
Rango	0,06
Kurtosis	-0,36
Sesgo Estandarizado	-0,73
<b>PERT</b>	<b>0,06</b>

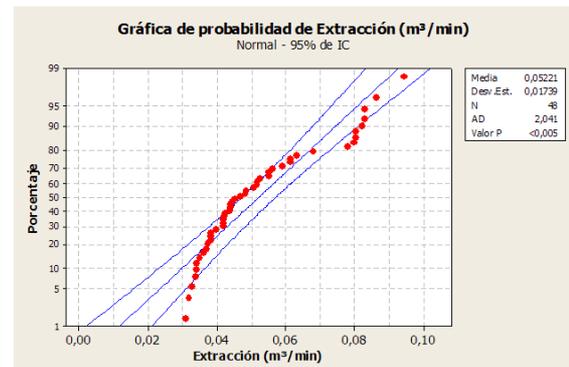


Gráfico 8. Gráfico de Probabilidad Normal –Extracción  
Programa: MINITAB16

- Tiempo de desconche

No hay datos

## Proceso de Soporte

- Colocación de concreto lanzado

<b>Cuadro 12. Resumen Estadístico para Colocación Concreto (min/m<sup>3</sup>)</b>	
Conteo Total	28
Promedio	25,14
Mediana	25,00
Desviación Estándar	6,07
Coefficiente de Variación	24,14%
Mínimo	14,64
Máximo	35,45
Rango	20,81
Kurtosis	-0,98
Sesgo Estandarizado	-0,83
<b>PERT</b>	<b>25,11</b>

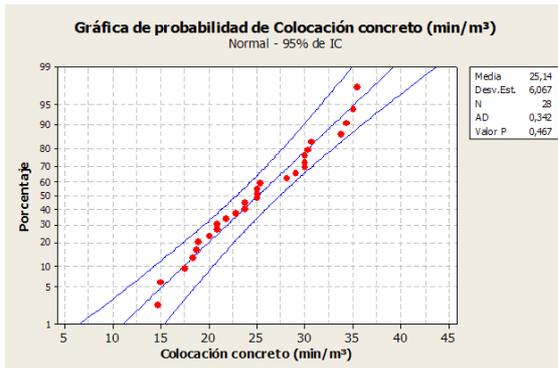


Gráfico 9. Gráfico de Probabilidad Normal – Colocación concreto lanzado  
Programa: MINITAB 16

- Colocación de malla electrosoldada

<b>Cuadro 13. Resumen Estadístico para Colocación malla (min-persona/m<sup>2</sup>)</b>	
Conteo Total	49
Promedio	8,55
Mediana	7,50
Desviación Estándar	3,57
Coefficiente de Variación	41,82%
Mínimo	3,00
Máximo	18,00
Rango	15,00
Kurtosis	-0,33
Sesgo Estandarizado	-0,26
<b>PERT</b>	<b>9,20</b>

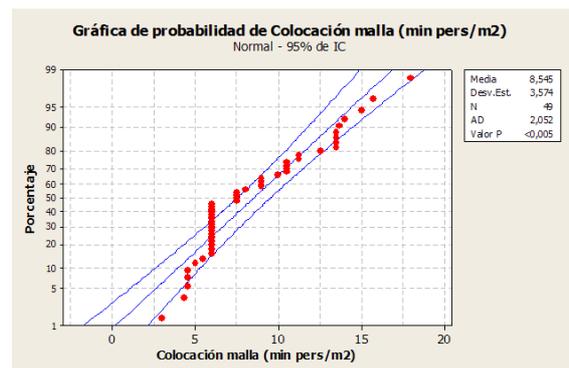


Gráfico 10. Gráfico de Probabilidad Normal – Colocación de malla electrosoldada  
Programa: MINITAB 16

- Barrenado de pernos

No hay datos

- Colocación de pernos

No hay datos

- Colocación de anillo

<b>Cuadro 14. Resumen Estadístico para Colocación anillo (min/m)</b>	
Conteo Total	63
Promedio	8,27
Mediana	7,64
Desviación Estándar	2,98
Coefficiente de Variación	36,01%
Mínimo	3,83
Máximo	16,81
Rango	12,99
Kurtosis	0,52
Sesgo Estandarizado	1,38
<b>PERT</b>	<b>8,95</b>

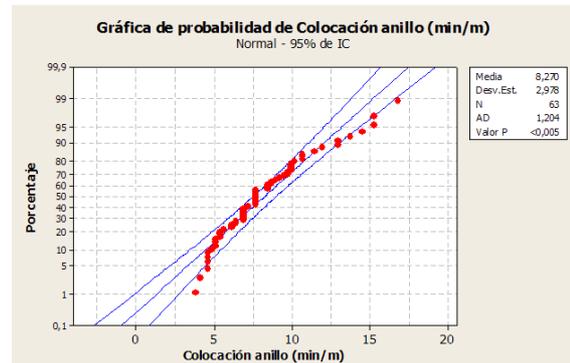


Gráfico 11. Gráfico de Probabilidad Normal – Colocación de anillo  
Programa: MINITAB 16

<b>Cuadro 15. Resumen de rendimientos obtenidos para cada actividad en la construcción de la sección regular del Pozo de Tubería Forzada.</b>					
Actividad	Unidad	Rendimientos			
		Obtenidos	Estimados	Diferencia Absoluta	Diferencia Porcentual
Acomodo de equipo para barrenar	<i>min</i>	15,12	32,8	17,68	53,90%
Barrenación	$\frac{\text{min} \cdot \text{máquina}}{\text{m}}$	12,05	6,02	-6,03	100,17%
Sacando equipo para barrenar	<i>min</i>	10,67	17,5	6,83	39,03%
Limpieza de huecos	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{\text{m}}$	0,46	ND	-	-
Cargada de explosivos	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{\text{kg}}$	22,28	13,09	-9,19	70,21%
Conexión y voladura	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{\text{fulminante}}$	3,24	2,67	-0,57	21,35%
Tiempo de humo	<i>min</i>	8,05	ND	-	-
Tiempo de desconche	<i>min</i>	-	ND	-	-
Extracción de material	$\frac{\text{m}^3}{\text{min}}$	0,06	0,583	0,52	89,71%
Colocación concreto lanzado	$\frac{\text{min}}{\text{m}^3}$	25,11	24,3	-0,81	3,33%
Barrenado de pernos	$\frac{\text{min} \cdot \text{máquina}}{\text{m}}$	-	12,05	-	-
Colocación de pernos	$\frac{\text{min}}{\text{unidad}}$	-	1,52	-	-
Colocación de malla electrosoldada	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{\text{m}^2}$	9,2	13,91	4,71	33,86%
Colocación de anillo	$\frac{\text{min}}{\text{m}}$	8,95	7,49	-1,46	19,49%

# Pozo Tubería Forzada Sección Irregular

## Proceso de Barrenación

- Acomodo de equipo para barrenar.

Cuadro 16. Resumen Estadístico para Acomodo Equipo (min)	
Conteo Total	9
Promedio	23,33
Mediana	25,00
Desviación Estándar	7,91
Coefficiente de Variación	33,88%
Mínimo	10,00
Máximo	30,00
Rango	12,99
Kurtosis	-1,20
Sesgo Estandarizado	-0,53
<b>PERT</b>	<b>22,22</b>

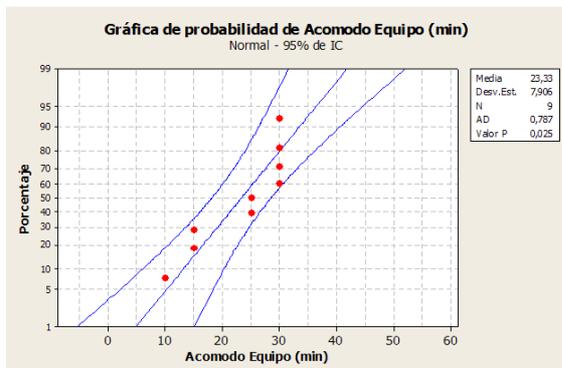


Gráfico 12. Gráfico de Probabilidad Normal – Acomodo equipo Programa: MINITAB 16

- Barrenación

Cuadro 17. Resumen Estadístico para Barrenación (min-máquina/m)	
Conteo Total	9
Promedio	22,92
Mediana	23,66
Desviación Estándar	11,20
Coefficiente de Variación	48,87%
Mínimo	8,33
Máximo	36,67
Rango	28,33
Kurtosis	-1,73
Sesgo Estandarizado	1,27
<b>PERT</b>	<b>22,78</b>

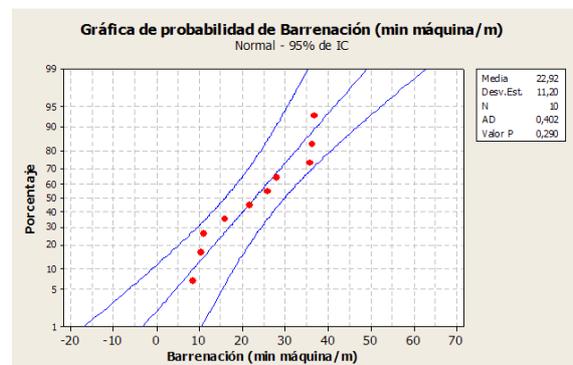


Gráfico 13. Gráfico de Probabilidad Normal – Barrenación Programa: MINITAB 16

## Proceso de Carga y Voladura

- Retiro de equipo

<b>Cuadro 18. Resumen Estadístico para Retiro de equipo (min)</b>	
Conteo Total	9
Promedio	13,33
Mediana	15,00
Desviación Estándar	2,50
Coefficiente de Variación	18,75%
Mínimo	10,00
Máximo	15,00
Rango	5,00
Sesgo Estandarizado	-1,05
Curtosis Estandarizada	-1,05
<b>PERT</b>	<b>13,06</b>

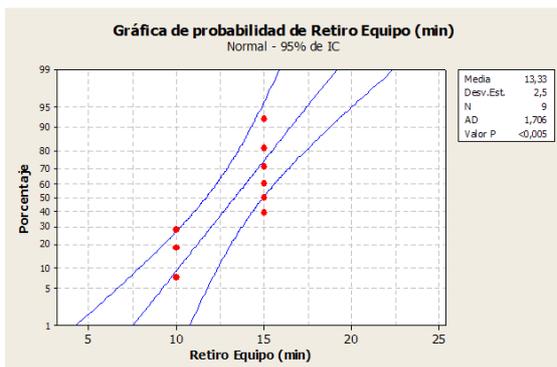


Gráfico 14. Gráfico de Probabilidad Normal – Retiro de equipo  
Programa: MINITAB 16

- Limpieza de huecos

<b>Cuadro 19. Resumen Estadístico para Limpieza de huecos (min-persona/m)</b>	
Conteo Total	4
Promedio	0,69
Mediana	0,40
Desviación Estándar	0,66
Coefficiente de Variación	96,63%
Mínimo	0,28
Máximo	1,67
Rango	1,36
Kurtosis	-0,50
Sesgo Estandarizado	0,92
<b>PERT</b>	<b>0,78</b>

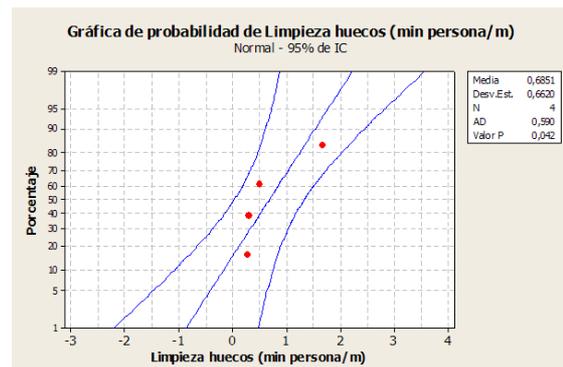


Gráfico 15. Gráfico de Probabilidad Normal – Limpieza de huecos  
Programa: MINITAB 16

- Carga de explosivo

<b>Cuadro 20. Resumen Estadístico para Carga explosivo (min-persona/kg)</b>	
Conteo Total	9
Promedio	11,73
Mediana	10,36
Desviación Estándar	4,48
Coefficiente de Variación	38,21%
Mínimo	6,90
Máximo	18,94
Rango	12,04
Kurtosis	-1,35
Sesgo Estandarizado	-1,52
<b>PERT</b>	<b>12,13</b>

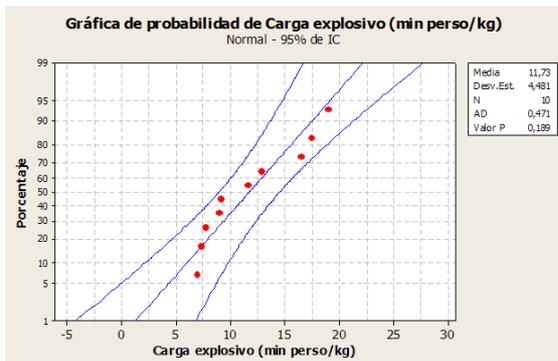


Gráfico 16. Gráfico de Probabilidad Normal – Carga explosivo  
Programa: MINITAB 16

- Conexión y voladura

<b>Cuadro 21. Resumen Estadístico para Conexión / Voladura (min-persona/fulminante)</b>	
Conteo Total	9
Promedio	2,73
Mediana	2,59
Desviación Estándar	1,02
Coefficiente de Variación	37,28%
Mínimo	1,01
Máximo	4,71
Rango	3,69
Kurtosis	1,60
Sesgo Estandarizado	0,73
<b>PERT</b>	<b>2,77</b>

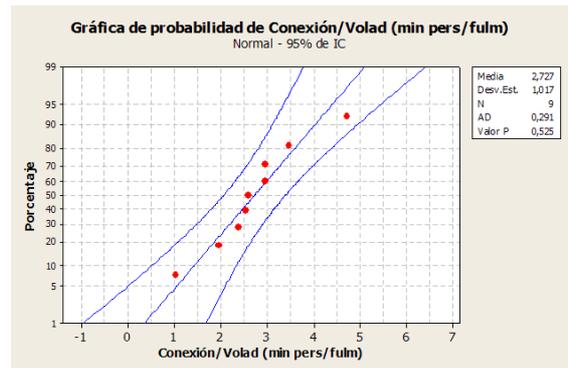


Gráfico 17. Gráfico de Probabilidad Normal  
Conexión/voladura  
Programa: MINITAB 16

- Tiempo de humo

Cuadro 22. Resumen Estadístico para Tiempo de humo (min)	
Conteo Total	9
Promedio	9,50
Mediana	10,00
Desviación Estándar	3,69
Coefficiente de Variación	38,83%
Mínimo	5,00
Máximo	15,00
Rango	10,00
Kurtosis	-0,73
Sesgo Estandarizado	0,81
<b>PERT</b>	<b>9,67</b>

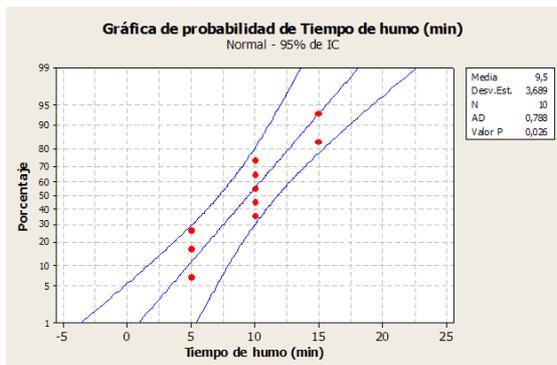


Gráfico 18. Gráfico de Probabilidad Normal – Tiempo de humo  
Programa: MINITAB 16

- Extracción del material

Cuadro 23. Resumen Estadístico para Extracción (m <sup>3</sup> /min)	
Conteo Total	9
Promedio	0,06
Mediana	0,05
Desviación Estándar	0,05
Coefficiente de Variación	80,48%
Mínimo	0,01
Máximo	0,16
Rango	0,14
Kurtosis	1,48
Sesgo Estandarizado	0,10
<b>PERT</b>	<b>0,07</b>

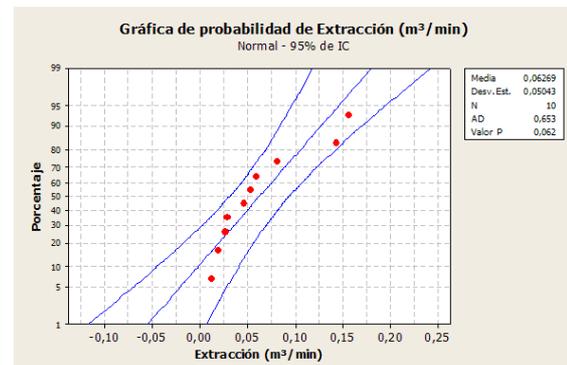


Gráfico 19. Gráfico de Probabilidad Normal – Extracción  
Programa: MINITAB 16

- Tiempo de desconche

Sólo se cuenta con una toma de datos que registra esta actividad con **10 minutos**.

## Proceso de Soporte

- Colocación de concreto lanzado

<b>Cuadro 24. Resumen Estadístico para Colocación Concreto (min/m<sup>3</sup>)</b>	
Conteo Total	5
Promedio	34,39
Mediana	37,50
Desviación Estándar	6,87
Coefficiente de Variación	19,99%
Mínimo	26,47
Máximo	40,91
Rango	14,44
Kurtosis	-0,44
Sesgo Estandarizado	-1,40
<b>PERT</b>	<b>34,15</b>

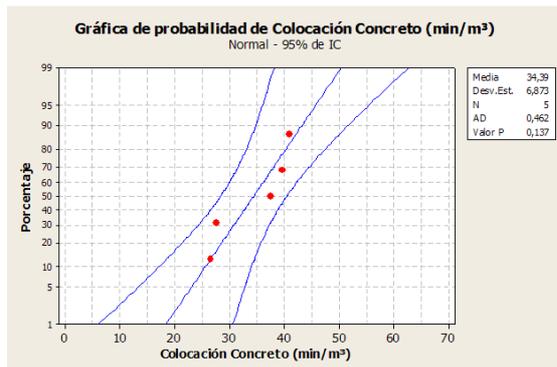


Gráfico 20. Gráfico de Probabilidad Normal – Colocación concreto  
Programa: MINITAB 16

- Colocación de malla electrosoldada

<b>Cuadro 25. Resumen Estadístico para Colocación malla (min-persona/m<sup>2</sup>)</b>	
Conteo Total	6
Promedio	19,85
Mediana	13,45
Desviación Estándar	13,22
Coefficiente de Variación	66,60%
Mínimo	7,77
Máximo	41,14
Rango	33,37
Kurtosis	-0,50
Sesgo Estandarizado	0,92
<b>PERT</b>	<b>21,39</b>

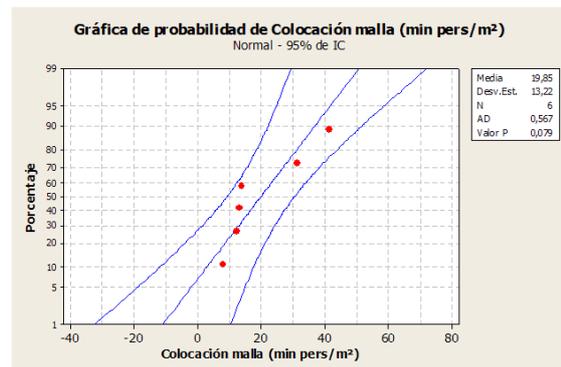


Gráfico 21. Gráfico de Probabilidad Normal – Colocación malla  
Programa: MINITAB 16

- Barrenado de pernos

Sólo se cuenta con una toma de datos que registra esta actividad con **8,63 minutos ·persona/m.**

- Colocación de pernos

Sólo se cuenta con una toma de datos que registra esta actividad con **17,68 min/unidad**

- Colocación de anillo

<b>Cuadro 26. Resumen Estadístico para Colocación anillo (min/m)</b>	
Conteo Total	4
Promedio	11,79
Mediana	12,45
Desviación Estándar	4,35
Coefficiente de Variación	36,87%
Mínimo	6,46
Máximo	15,79
Rango	9,32
Kurtosis	-1,70
Sesgo Estandarizado	0,92
<b>PERT</b>	<b>11,57</b>

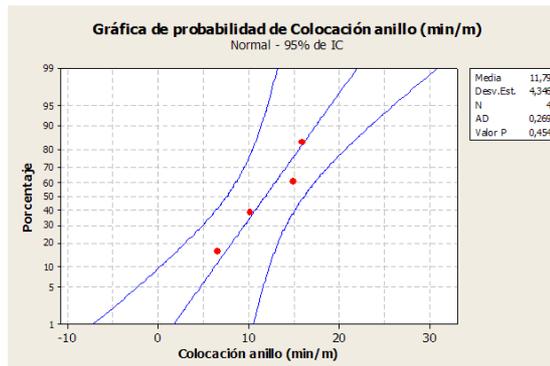


Gráfico 22. Gráfico Probabilidad Normal – Colocación anillo  
Programa: MINITAB 16

**Cuadro 27. Resumen de rendimientos obtenidos para cada actividad en la construcción de la sección irregular del Pozo de Tubería Forzada.**

Actividad	Unidad	Rendimientos			
		Obtenidos	Estimados	Diferencia Absoluta	Diferencia Porcentual
Acomodo de equipo para barrenar	<i>min</i>	22,22	32,8	10,58	32,26%
Barrenación	$\frac{\text{min} \cdot \text{máquina}}{\text{m}}$	22,78	6,02	-16,76	278,41%
Sacando equipo para barrenar	<i>min</i>	13,06	17,5	4,44	25,37%
Limpieza de huecos	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{\text{m}}$	0,78	ND	-	-
Cargada de explosivos	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{\text{kg}}$	12,13	13,09	0,96	7,33%
Conexión y voladura	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{\text{fulminante}}$	2,77	2,67	-0,10	3,75%
Tiempo de humo	<i>min</i>	9,67	ND	-	-
Tiempo de desconche	<i>min</i>	10	ND	-	-
Extracción de material	$\frac{\text{m}^3}{\text{min}}$	0,07	0,583	0,51	87,99%
Colocación concreto lanzado	$\frac{\text{min}}{\text{m}^3}$	34,15	24,3	-9,85	40,53%
Barrenado de pernos	$\frac{\text{min} \cdot \text{máquina}}{\text{m}}$	8,63	12,05	3,42	28,38%
Colocación de pernos	$\frac{\text{min}}{\text{unidad}}$	1,68	1,52	-0,16	10,53%
Colocación de malla electrosoldada	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{\text{m}^2}$	21,39	13,91	-7,48	53,77%
Colocación de anillo	$\frac{\text{min}}{\text{m}}$	11,57	7,49	-4,08	54,47%

# Pozo Aporte La Flor

## Proceso de Barrenación

- Acomodo de equipo para barrenar

<b>Cuadro 28. Resumen Estadístico para Acomodo Equipo (min)</b>	
Conteo Total	17
Promedio	16,76
Mediana	15,00
Desviación Estándar	4,98
Coficiente de Variación	29,71%
Mínimo	15,00
Máximo	30,00
Rango	15,00
Kurtosis	1,24
Sesgo estandarizado	1,93
<b>PERT</b>	<b>18,67</b>

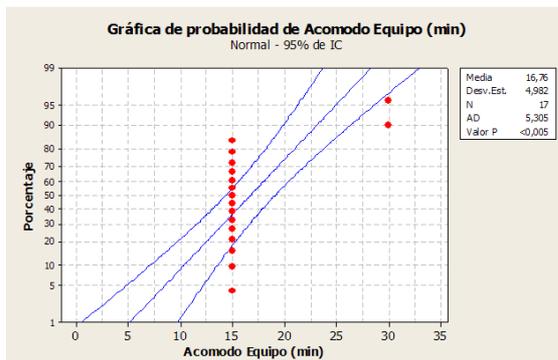


Gráfico 23. Gráfico de Probabilidad Normal – Acomodo equipo  
Programa: MINITAB 16

- Barrenación

<b>Cuadro 29. Resumen Estadístico para Barrenación (min-máquina/m)</b>	
Conteo Total	13
Promedio	9,39
Mediana	7,68
Desviación Estándar	5,37
Coficiente de Variación	57,18%
Mínimo	3,87
Máximo	7,68
Rango	16,51
Kurtosis	-1,23
Sesgo Estandarizado	-0,98
<b>PERT</b>	<b>8,19</b>

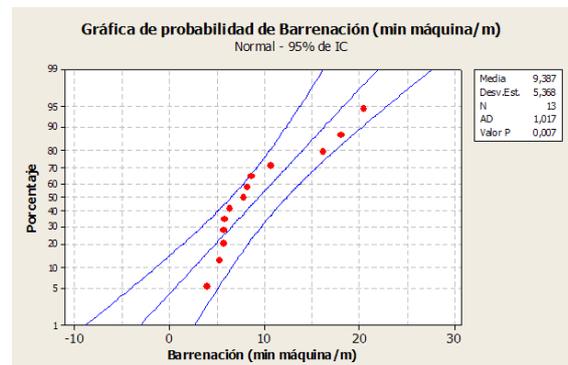


Gráfico 24. Gráfico de Probabilidad Normal –Barrenación  
Programa: MINITAB 16

## Proceso de Carga y Voladura

- Retiro de equipo

<b>Cuadro 30. Resumen Estadístico para Retiro de equipo (min)</b>	
Conteo Total	17
Promedio	16,76
Mediana	15,00
Desviación Estándar	4,98
Coefficiente de Variación	29,71%
Mínimo	15,00
Máximo	30,00
Rango	15,00
Kurtosis	1,24
Sesgo Estandarizado	1,93
<b>PERT</b>	<b>18,67</b>

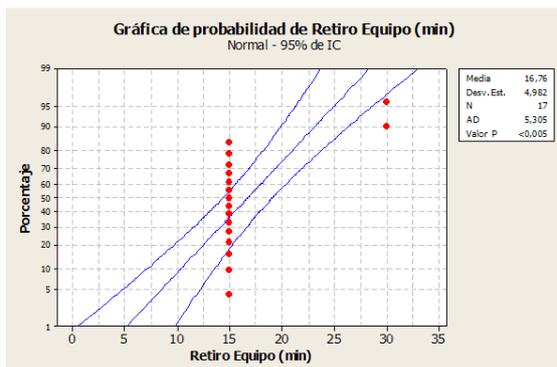


Gráfico 25. Gráfico de Probabilidad Normal – Retiro de equipo  
Programa: MINITAB 16

- Limpieza de huecos

<b>Cuadro 31. Resumen Estadístico para Limpieza de huecos (min-persona/m)</b>	
Conteo Total	14
Promedio	0,99
Mediana	0,91
Desviación Estándar	0,39
Coefficiente de Variación	39,61%
Mínimo	0,56
Máximo	0,91
Rango	1,02
Kurtosis	-1,70
Sesgo Estandarizado	0,85
<b>PERT</b>	<b>0,91</b>

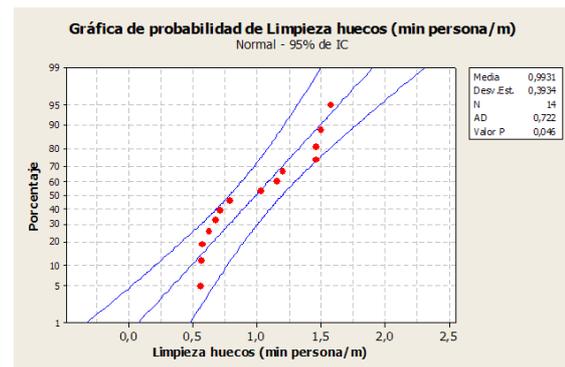


Gráfico 26. Gráfico de Probabilidad Normal – Limpieza de huecos  
Programa: MINITAB 16

- Carga de explosivo

<b>Cuadro 32. Resumen Estadístico para Carga explosivo (min-persona/kg)</b>	
Conteo Total	17
Promedio	3,79
Mediana	3,44
Desviación Estándar	2,09
Coefficiente de Variación	55,29%
Mínimo	0,74
Máximo	8,17
Rango	7,43
Kurtosis	-0,33
Sesgo Estandarizado	-0,42
<b>PERT</b>	<b>4,01</b>

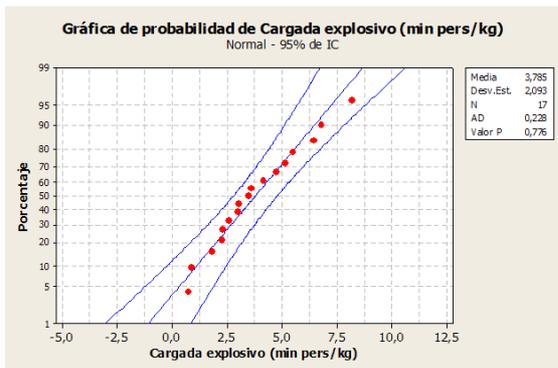


Gráfico 27. Gráfico de Probabilidad Normal – Carga explosivo  
Programa: MINITAB16

- Conexión y voladura

<b>Cuadro 33. Resumen Estadístico para Conexión / Voladura (min-persona/fulminante)</b>	
Conteo Total	17
Promedio	1,07
Mediana	1,11
Desviación Estándar	0,38
Coefficiente de Variación	35,21%
Mínimo	0,55
Máximo	1,54
Rango	0,99
Kurtosis	-1,65
Sesgo Estandarizado	-1,91
<b>PERT</b>	<b>1,06</b>

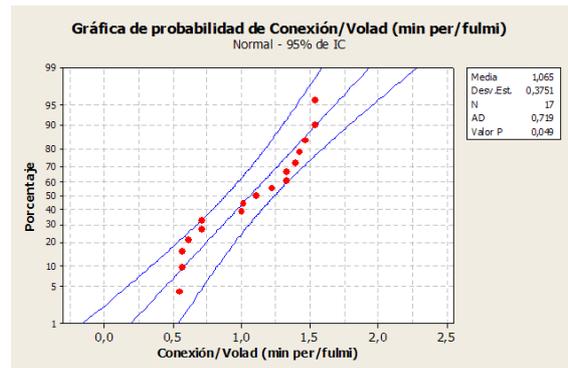


Gráfico 28. Gráfico de Probabilidad Normal  
Conexión/voladura  
Programa: MINITAB 16

- Tiempo de humo

<b>Cuadro 34. Resumen Estadístico para Tiempo de humo (min)</b>	
Conteo Total	16
Promedio	5,31
Mediana	5,00
Desviación Estándar	1,25
Coefficiente de Variación	23,53%
Mínimo	5,00
Máximo	10,00
Rango	5,00
Kurtosis	1,60
Sesgo Estandarizado	0,93
<b>PERT</b>	<b>6,04</b>

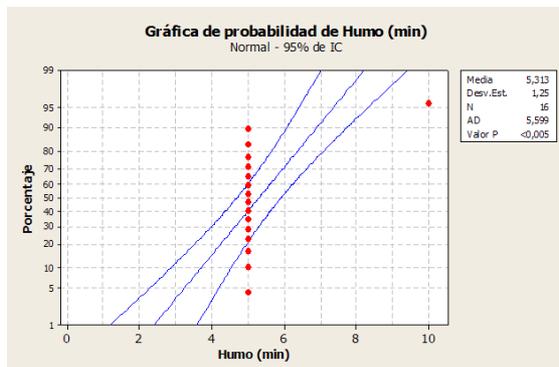


Gráfico 29. Gráfico de Probabilidad Normal – Tiempo de humo  
Programa: MINITAB 16

- Extracción del material

<b>Cuadro 35. Resumen Estadístico para Extracción (m³/min)</b>	
Conteo Total	18
Promedio	0,04
Mediana	0,04
Desviación Estándar	0,01
Coefficiente de Variación	28,18%
Mínimo	0,02
Máximo	0,06
Rango	0,04
Kurtosis	-0,54
Sesgo Estandarizado	-0,89
<b>PERT</b>	<b>0,04</b>

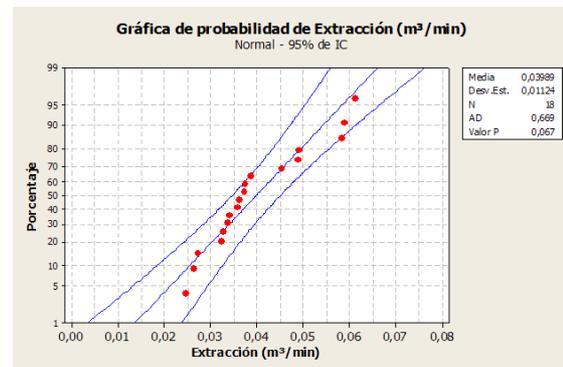


Gráfico 30. Gráfico de Probabilidad Normal – Extracción  
Programa: MINITAB 16

- Tiempo de desconche

No hay datos

## Proceso de Soporte

- Colocación de concreto lanzado

<b>Cuadro 36. Resumen Estadístico para Colocación Concreto (min/m<sup>3</sup>)</b>	
Conteo Total	14
Promedio	23,04
Mediana	20,31
Desviación Estándar	6,26
Coefficiente de Variación	27,17%
Mínimo	17,50
Máximo	37,50
Rango	20,00
Kurtosis	1,54
Sesgo Estandarizado	0,62
<b>PERT</b>	<b>24,53</b>

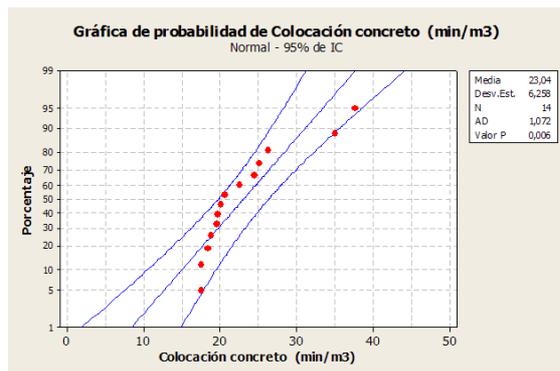


Gráfico 31. Gráfico de Probabilidad Normal – Colocación concreto  
Programa: MINITAB 16

- Colocación de malla electrosoldada

<b>Cuadro 37. Resumen Estadístico para Colocación malla (min-persona/m<sup>2</sup>)</b>	
Conteo Total	15
Promedio	12,08
Mediana	10,67
Desviación Estándar	3,28
Coefficiente de Variación	27,91%
Mínimo	8,00
Máximo	20,00
Rango	12,00
Kurtosis	0,96
Sesgo Estandarizado	0,74
<b>PERT</b>	<b>12,72</b>

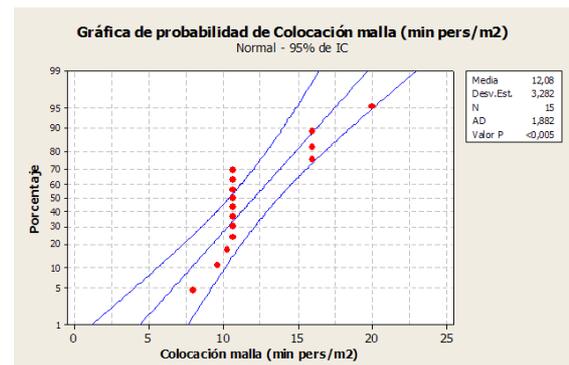


Gráfico 32. Gráfico de Probabilidad Normal – Colocación malla  
Programa: MINITAB 16

- Barrenado de pernos

No hay datos

- Colocación de pernos

No hay datos

- Colocación de anillo

<b>Cuadro 38. Resumen Estadístico para Colocación anillo (min/m)</b>	
Conteo Total	21
Promedio	8,64
Mediana	9,17
Desviación Estándar	2,53
Coefficiente de Variación	29,33%
Mínimo	4,58
Máximo	12,99
Rango	8,40
Kurtosis	-0,71
Sesgo Estandarizado	-0,53
<b>PERT</b>	<b>8,69</b>

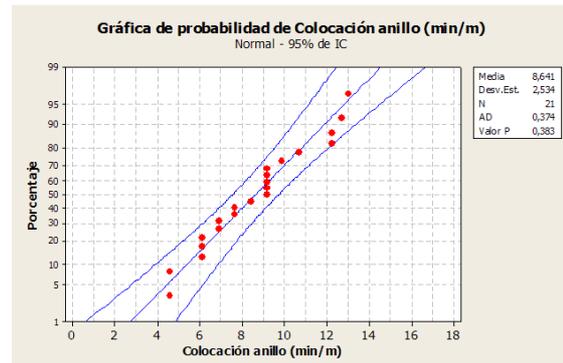


Gráfico 33. Gráfico Probabilidad Normal – Colocación anillo  
Programa: MINITAB 16

<b>Cuadro 39. Resumen de rendimientos obtenidos para cada actividad en la construcción del Pozo Aporte La Flor</b>					
Actividad	Unidad	Rendimientos			
		Obtenidos	Estimados	Diferencia Absoluta	Diferencia Porcentual
Acomodo de equipo para barrenar	<i>min</i>	18,67	32,8	14,13	43,08%
Barrenación	$\frac{\text{min} \cdot \text{máquina}}{\text{m}}$	8,19	6,02	-2,17	36,05%
Sacando equipo para barrenar	<i>min</i>	18,67	17,5	-1,17	6,69%
Limpieza de huecos	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{\text{m}}$	0,91	ND	-	-
Cargada de explosivos	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{\text{kg}}$	4,01	13,09	9,08	69,37%
Conexión y voladura	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{\text{fulminante}}$	1,06	2,67	1,61	60,30%
Tiempo de humo	<i>min</i>	6,04	ND	-	-
Tiempo de desconche	<i>min</i>	ND	ND	-	-
Extracción de material	$\frac{\text{m}^3}{\text{min}}$	0,04	0,583	0,54	93,14%
Colocación concreto lanzado	$\frac{\text{min}}{\text{m}^3}$	24,53	24,3	-0,23	0,95%
Barrenado de pernos	$\frac{\text{min} \cdot \text{máquina}}{\text{m}}$	ND	12,05	-	-
Colocación de pernos	$\frac{\text{min}}{\text{unidad}}$	ND	1,52	-	-
Colocación de malla electrosoldada	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{\text{m}^2}$	12,72	13,91	1,19	8,55%
Colocación de anillo	$\frac{\text{min}}{\text{m}}$	8,69	7,49	-1,20	16,02%

<b>Cuadro 40. Comparación agrupando bajo las mismas actividades de los tres diferentes frentes de trabajo de excavación de pozos</b>					
Actividad	Unidad	Rendimientos			
		Estimados	Pozo TF Sección Regular	Pozo TF Sección Irregular	Pozo Aporte La Flor
Acomodo de equipo para barrenar	<i>min</i>	32,8	15,12	22,22	18,67
Barrenación	$\frac{\text{min} \cdot \text{máquina}}{\text{m}}$	6,02	12,05	22,78	8,19
Sacando equipo para barrenar	<i>min</i>	17,5	10,67	13,06	18,67
Limpieza de huecos	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{\text{m}}$	ND	0,46	0,78	0,91
Cargada de explosivos	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{\text{kg}}$	13,09	22,28	12,13	4,01
Conexión y voladura	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{\text{fulminante}}$	2,67	3,24	2,77	1,06
Tiempo de humo	<i>min</i>	ND	8,05	9,67	6,04
Tiempo de desconche	<i>min</i>	ND	ND	10	ND
Extracción de material	$\frac{\text{m}^3}{\text{min}}$	0,583	0,06	0,07	0,04
Colocación concreto lanzado	$\frac{\text{min}}{\text{m}^3}$	24,3	25,11	34,15	24,53
Barrenado de pernos	$\frac{\text{min} \cdot \text{máquina}}{\text{m}}$	12,05	ND	0,96	ND
Colocación de pernos	$\frac{\text{min}}{\text{unidad}}$	1,52	ND	1,68	ND
Colocación de malla electrosoldada	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{\text{m}^2}$	13,91	9,20	21,39	12,72
Colocación de anillo	$\frac{\text{min}}{\text{m}}$	7,49	8,95	11,57	8,69

# Túnel Tubería Forzada

## Proceso de Barrenación

- Acomodo de equipo para barrenar.
- Barrenación

Cuadro 41. Resumen Estadístico para Acomodo Equipo (min)	
Conteo Total	141
Promedio	11,84
Mediana	10
Desviación Estándar	3,13
Coefficiente de Variación	26,42%
Mínimo	5
Máximo	20
Rango	15
Kurtosis	0,74
Sesgo Estandarizado	1,13
<b>PERT</b>	<b>12,06</b>

Cuadro 42. Resumen Estadístico para Barrenación (min-máquina/m)	
Conteo Total	142
Promedio	4,66
Mediana	3,97
Desviación Estándar	2,29
Coefficiente de Variación	49,25%
Mínimo	0,26
Máximo	12,00
Rango	11,73
Kurtosis	1,28
Sesgo Estandarizado	1,12
<b>PERT</b>	<b>5,15</b>

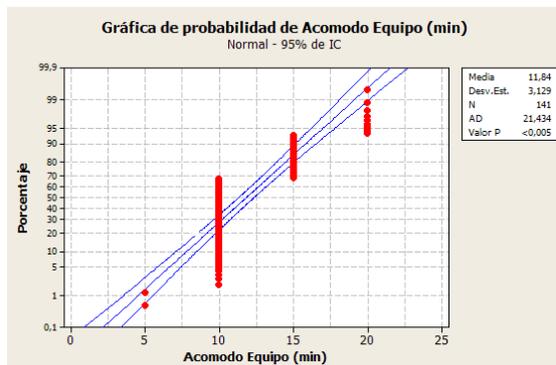


Gráfico 34. Gráfico de Probabilidad Normal – Acomodo equipo  
Programa: MINITAB 16

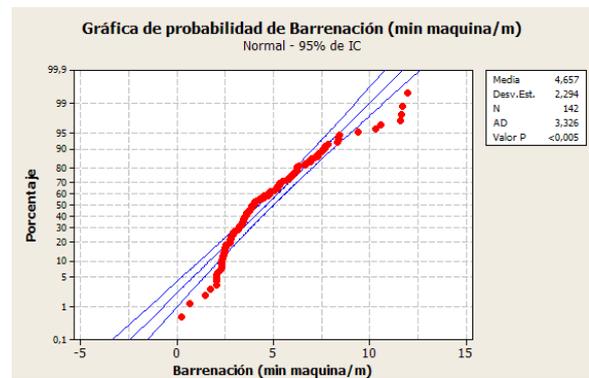


Gráfico 35. Gráfico de Probabilidad Normal – Barrenación  
Programa: MINITAB 16

## Proceso de Carga y Voladura

- Retiro de equipo

<b>Cuadro 43. Resumen Estadístico para Retiro de equipo (min)</b>	
Conteo Total	143
Promedio	8,43
Mediana	10
Desviación Estándar	3,58
Coefficiente de Variación	42,50%
Mínimo	5
Máximo	15
Rango	10
Kurtosis	-0,89
Sesgo Estandarizado	0,55
<b>PERT</b>	<b>8,95</b>

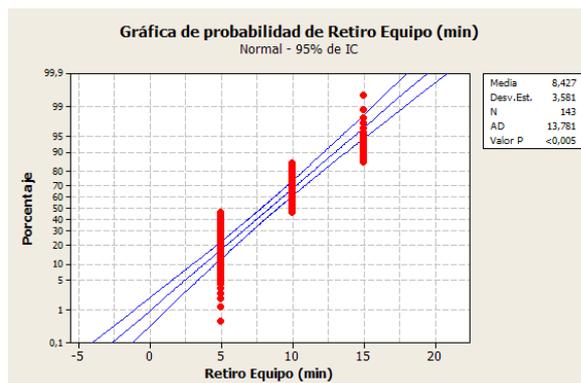


Gráfico 36. Gráfico de Probabilidad Normal – Retiro de equipo  
Programa: MINITAB 16

- Limpieza de huecos

<b>Cuadro 44 . Resumen Estadístico para Limpieza de huecos (min-persona/m)</b>	
Conteo Total	14
Promedio	0,36
Mediana	0,37
Desviación Estándar	0,08
Coefficiente de Variación	21,90%
Mínimo	0,19
Máximo	0,47
Rango	0,28
Kurtosis	-0,27
Sesgo Estandarizado	-0,45
<b>PERT</b>	<b>0,35</b>

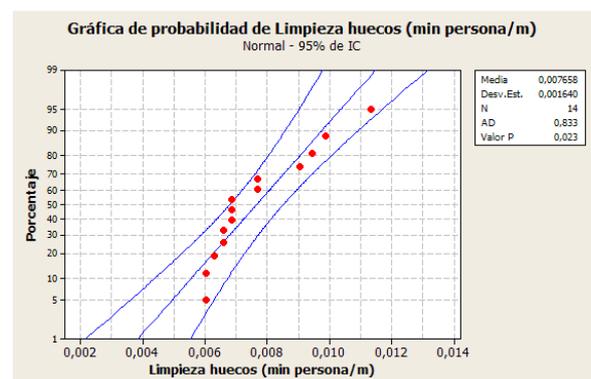


Gráfico 37. Gráfico de Probabilidad Normal – Limpieza de huecos  
Programa: MINITAB 16

- Carga de explosivo

<b>Cuadro 45. Resumen Estadístico para Carga explosivo (min-persona/kg)</b>	
Conteo Total	117
Promedio	10,11
Mediana	10,23
Desviación Estándar	3,06
Coefficiente de Variación	30,27%
Mínimo	4,86
Máximo	17,92
Rango	13,06
Kurtosis	-0,68
Sesgo Estandarizado	0,32
<b>PERT</b>	<b>10,54</b>

- Conexión y voladura

<b>Cuadro 46. Resumen Estadístico para Conexión / Voladura (min-persona/fulminante)</b>	
Conteo Total	112
Promedio	1,37
Mediana	1,30
Desviación Estándar	0,24
Coefficiente de Variación	18,04%
Mínimo	0,91
Máximo	2,07
Rango	1,16
Kurtosis	0,04
Sesgo Estandarizado	0,92
<b>PERT</b>	<b>1,41</b>

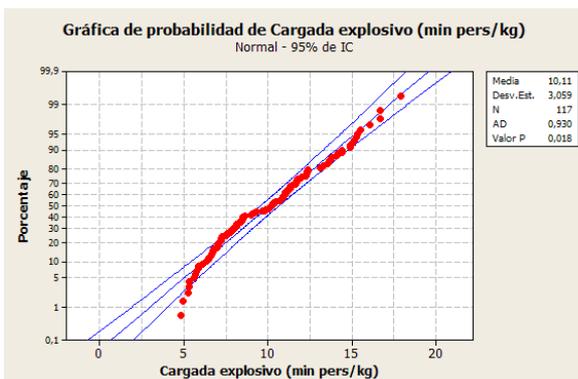


Gráfico 38. Gráfico de Probabilidad Normal – Carga explosivo  
Programa: MINITAB 16

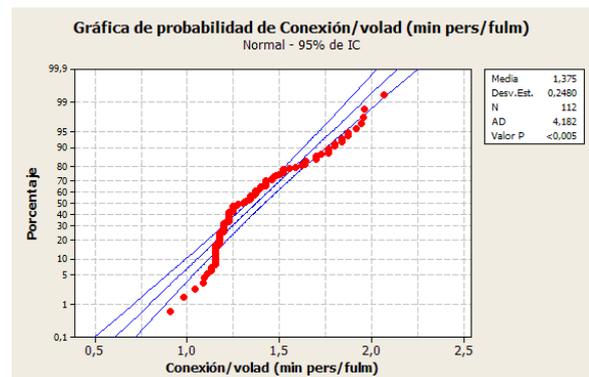


Gráfico 39. Gráfico de Probabilidad Normal  
Conexión/voladura  
Programa: MINITAB 16

- Tiempo de humo

<b>Cuadro 47. Resumen Estadístico para Tiempo de humo (min)</b>	
Conteo Total	142
Promedio	12,96
Mediana	10
Desviación Estándar	3,63
Coefficiente de Variación	28,01%
Mínimo	5
Máximo	10
Rango	15
Kurtosis	-0,56
Sesgo Estandarizado	0,58
<b>PERT</b>	<b>11,14</b>

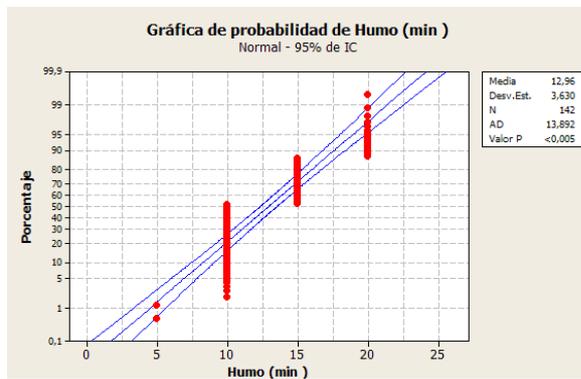


Gráfico 40. Gráfico de Probabilidad Normal – Tiempo de humo  
Programa: MINITAB 16

- Extracción del material

<b>Cuadro 48. Resumen Estadístico para Extracción (m³/min)</b>	
Conteo Total	163
Promedio	15,30
Mediana	13,04
Desviación Estándar	7,17
Coefficiente de Variación	46,90%
Mínimo	5,79
Máximo	37,50
Rango	31,71
Kurtosis	1,18
Sesgo Estandarizado	1,26
<b>PERT</b>	<b>17,42</b>

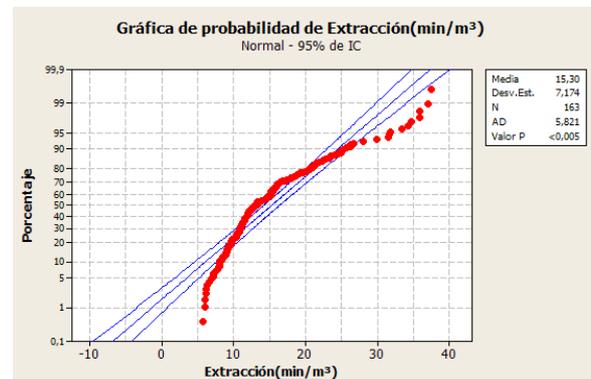


Gráfico 41. Gráfico de Probabilidad Normal – Extracción  
Programa: MINITAB 16

- Tiempo de desconche

No hay datos

## Proceso de Soporte

- Colocación de concreto lanzado

<b>Cuadro 49. Resumen Estadístico para Colocación Concreto (min/m<sup>3</sup>)</b>	
Conteo Total	6
Promedio	51,05
Mediana	45,83
Desviación Estándar	22,38
Coefficiente de Variación	43,84%
Mínimo	30
Máximo	90
Rango	60
Kurtosis	1,04
Sesgo Estandarizado	1,17
<b>PERT</b>	<b>54,03</b>

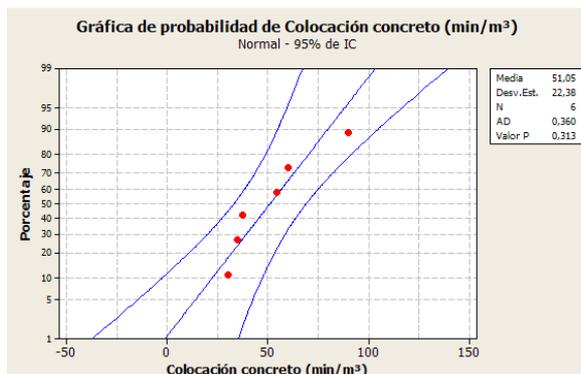


Gráfico 42. Gráfico de Probabilidad Normal – Colocación concreto  
Programa: MINITAB 16

- Colocación de malla electrosoldada

<b>Cuadro 50. Resumen Estadístico para Colocación malla (min-persona/m<sup>2</sup>)</b>	
Conteo Total	15
Promedio	12,08
Mediana	10,67
Desviación Estándar	3,28
Coefficiente de Variación	27,17%
Mínimo	8
Máximo	20
Rango	12
Kurtosis	0,96
Sesgo Estandarizado	1,32
<b>PERT</b>	<b>12,72</b>

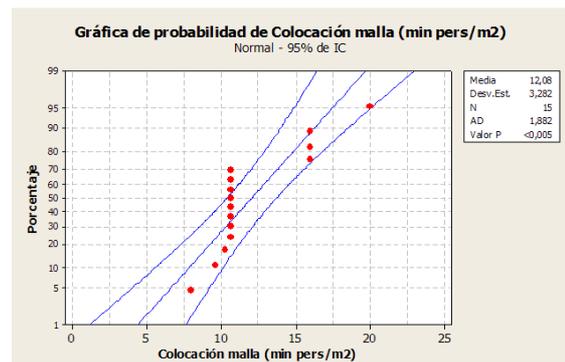


Gráfico 43. Gráfico de Probabilidad Normal – Colocación malla  
Programa: MINITAB 16

- Barrenado de pernos

No hay datos

- Colocación de pernos

No hay datos

- Colocación de arcos sin bóveda invertida

<b>Cuadro 51. Resumen Estadístico para Colocación de arcos sin bóveda invertida (min/m)</b>	
Conteo Total	126
Promedio	15,23
Mediana	13,82
Desviación Estándar	5,76
Coefficiente de Variación	37,80%
Mínimo	5,53
Máximo	35,93
Rango	30,40
Kurtosis	1,94
Sesgo Estandarizado	1,22
<b>PERT</b>	<b>17,06</b>

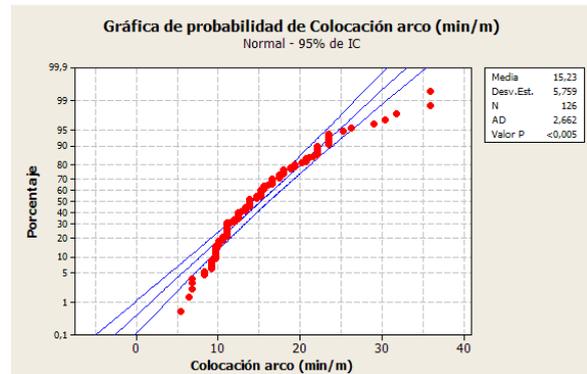


Gráfico 44. Gráfico de Probabilidad Normal – Colocación de arcos in bóveda invertida  
Programa: MINITAB 16

<b>Cuadro 52. Resumen de rendimientos obtenidos para cada actividad en la construcción del Túnel Tubería Forzada</b>					
Actividad	Unidad	Rendimientos			
		Obtenidos	Estimados	Diferencia Absoluta	Diferencia Porcentual
Acomodo de equipo para barrenar	min	12,06	31,70	19,64	61,96%
Barrenación	$\frac{\text{min} \cdot \text{máquina}}{\text{m}}$	5,15	2,21	-2,94	133,03%
Sacando equipo para barrenar	min	8,95	6,37	-2,58	40,50%
Limpieza de huecos	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{\text{m}}$	0,35	0,16	-0,19	118,75%
Cargada de explosivos	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{\text{kg}}$	10,54	7,57	-2,97	39,23%
Conexión y voladura	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{\text{fulminante}}$	1,41	2,29	0,88	38,43%
Tiempo de humo	min	11,14	10,87	-0,27	2,48%
Tiempo de desconche	min	ND	10,21	-	-
Extracción	$\frac{\text{min}}{\text{m}^3}$	17,42	ND	-	-
Colocación concreto lanzado	$\frac{\text{min}}{\text{m}^3}$	54,03	29,40	-24,63	83,78%
Barrenado de pernos	$\frac{\text{min} \cdot \text{máquina}}{\text{m}}$	ND	4,21	-	-
Colocación de pernos	$\frac{\text{min}}{\text{unidad}}$	ND	5,88	-	-
Colocación de malla electrosoldada	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{\text{m}^2}$	12,72	23,04	10,32	44,79%
Colocación de arco	$\frac{\text{min}}{\text{m}}$	17,06	13,47	-3,59	26,65%

## Comparación de Resultados PERT y Promedio Ponderado

Cuadro 53. Comparación entre datos obtenidos por Análisis PERT y el Promedio Ponderado de cada actividad de la construcción del Pozo de Tubería Forzada – Sección Regular					
Actividad	Unidad	Estimado	PERT	Promedio Ponderado	Diferencia
Acomodo de equipo para barrenar	<i>min</i>	32,8	15,12	15,19	A favor
Barrenación	$\frac{\text{min} \cdot \text{máquina}}{m}$	6,02	12,05	11,36	En contra
Sacando equipo para barrenar	<i>min</i>	17,5	10,67	11	A favor
Limpieza de huecos	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{m}$	ND	0,46	0,47	A favor
Cargada de explosivos	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{kg}$	13,09	22,28	21,24	En contra
Conexión y voladura	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{\text{fulminante}}$	2,67	3,24	3,32	A favor
Tiempo de humo	<i>min</i>	ND	8,05	8,33	A favor
Tiempo de desconche	<i>min</i>	ND	ND	ND	-
Extracción de material	$\frac{m^3}{\text{min}}$	0,583	0,06	0,05	En contra
Colocación concreto lanzado	$\frac{\text{min}}{m^3}$	24,3	25,11	25,14	A favor
Barrenado de pernos	$\frac{\text{min} \cdot \text{máquina}}{m}$	12,05	ND	ND	-
Colocación de pernos	$\frac{\text{min}}{\text{unidad}}$	1,52	ND	ND	-
Colocación de malla electrosoldada	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{m^2}$	13,91	9,2	8,55	En contra
Colocación de anillo	$\frac{\text{min}}{m}$	7,49	8,95	8,27	En contra

<b>Cuadro 54. Comparación entre datos obtenidos por Análisis PERT y el Promedio Ponderado de cada actividad de la construcción del Pozo de Tubería Forzada – Sección Irregular</b>					
Actividad	Unidad	Estimado	PERT	Promedio Ponderado	Diferencia
Acomodo de equipo para barrenar	<i>min</i>	32,8	22,22	23,33	A favor
Barrenación	$\frac{\text{min} \cdot \text{máquina}}{\text{m}}$	6,02	22,78	22,92	A favor
Sacando equipo para barrenar	<i>min</i>	17,5	13,06	13,33	A favor
Limpieza de huecos	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{\text{m}}$	ND	0,78	0,69	En contra
Cargada de explosivos	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{\text{kg}}$	13,09	12,13	11,73	En contra
Conexión y voladura	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{\text{fulminante}}$	2,67	2,77	2,73	En contra
Tiempo de humo	<i>min</i>	ND	9,67	9,50	En contra
Tiempo de desconche	<i>min</i>	ND	10	10	A favor
Extracción de material	$\frac{\text{m}^3}{\text{min}}$	0,583	0,07	0,06	En contra
Colocación concreto lanzado	$\frac{\text{min}}{\text{m}^3}$	24,3	34,15	34,39	A favor
Barrenado de pernos	$\frac{\text{min} \cdot \text{máquina}}{\text{m}}$	12,05	0,96	0,96	A favor
Colocación de pernos	$\frac{\text{min}}{\text{unidad}}$	1,52	1,68	1,68	A favor
Colocación de malla electrosoldada	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{\text{m}^2}$	13,91	21,39	19,85	En contra
Colocación de anillo	$\frac{\text{min}}{\text{m}}$	7,49	11,57	11,79	A favor

**Cuadro 55. Comparación entre datos obtenidos por Análisis PERT y el Promedio Ponderado de cada actividad de la construcción del Pozo Aporte La Flor**

Actividad	Unidad	Estimado	PERT	Promedio Ponderado	Diferencia
Acomodo de equipo para barrenar	<i>min</i>	32,8	18,67	16,76	En contra
Barrenación	$\frac{min \cdot máquina}{m}$	6,02	8,19	9,39	A favor
Sacando equipo para barrenar	<i>min</i>	17,5	18,67	16,76	En contra
Limpieza de huecos	$\frac{min \cdot persona}{m}$	ND	0,91	0,99	A favor
Cargada de explosivos	$\frac{min \cdot persona}{kg}$	13,09	4,01	3,79	En contra
Conexión y voladura	$\frac{min \cdot persona}{fulminante}$	2,67	1,06	1,07	A favor
Tiempo de humo	<i>min</i>	ND	6,04	5,31	En contra
Tiempo de desconche	<i>min</i>	ND	ND	ND	-
Extracción	$\frac{m^3}{min}$	0,583	0,04	0,04	A favor
Colocación concreto lanzado	$\frac{min}{m^3}$	24,3	24,53	23,04	En contra
Barrenado de pernos	$\frac{min \cdot máquina}{m}$	12,05	ND	ND	-
Colocación de pernos	$\frac{min}{unidad}$	1,52	ND	ND	-
Colocación de malla electrosoldada	$\frac{min \cdot persona}{m^2}$	13,91	12,72	12,08	En contra
Colocación de arco	$\frac{min}{m}$	7,49	8,69	8,64	En contra

<b>Cuadro 56. Comparación entre datos obtenidos por Análisis PERT y el Promedio Ponderado de cada actividad de la construcción del Túnel Tubería Forzada</b>					
Actividad	Unidad	Estimado	PERT	Promedio Ponderado	Diferencia
Acomodo de equipo para barrenar	<i>min</i>	31,7	12,06	11,84	En contra
Barrenación	$\frac{\text{min} \cdot \text{máquina}}{\text{m}}$	2,21	5,15	4,66	En contra
Sacando equipo para barrenar	<i>min</i>	6,37	8,95	8,43	En contra
Limpieza de huecos	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{\text{m}}$	0,16	0,35	0,36	A favor
Cargada de explosivos	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{\text{kg}}$	7,57	10,54	10,11	En contra
Conexión y voladura	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{\text{fulminante}}$	2,29	1,41	1,37	En contra
Tiempo de humo	<i>min</i>	10,87	11,14	12,96	A favor
Tiempo de desconche	<i>min</i>	10,21	ND	ND	-
Extracción	$\frac{\text{min}}{\text{m}^3}$	ND	17,42	15,3	En contra
Concreto lanzado	$\frac{\text{min}}{\text{m}^3}$	29,4	54,03	51,05	En contra
Barrenado pernos	$\frac{\text{min} \cdot \text{máquina}}{\text{m}}$	4,21	ND	ND	-
Colocación pernos	$\frac{\text{min}}{\text{unidad}}$	5,88	ND	ND	-
Colocación de malla	$\frac{\text{min} \cdot \text{persona}}{\text{m}^2}$	23,04	12,72	12,08	En contra
Colocación de arcos sin bóveda invertida	$\frac{\text{min}}{\text{m}}$	13,47	17,06	15,23	En contra

# Análisis de los resultados

## Análisis constructivo

En la excavación del pozo de tubería forzada se utilizó una sección transversal de 5 metros de diámetro por una profundidad de 70,15 metros; más los últimos 8,70 metros de excavación la sección varió y pasó a ser elíptica y conforme aumentaba la profundidad, el perímetro de esta lo hacía también. Por lo anterior, se decidió dividir la excavación en dos segmentos: sección regular y sección irregular.

### Sección Regular Pozo Tubería Forzada

La excavación de la sección regular se realizó desde la elevación 499,675 msnm y terminó en la 438,227 msnm, conformando así una diferencia de altura de 61,45 metros.

Se comenzó el 12 de setiembre del 2011 con el ciclo completo del primer metro de avance.

Cada ciclo se refiere al proceso completo de trabajo en obras subterráneas, es decir, la perforación, carga y detonación, ventilación, carga y transporte, desconche y limpieza y estabilización.

La excavación de toda la sección regular del pozo terminó en el ciclo número 60, el 18 de noviembre del 2011.



Ilustración 2. Primer anillo de Pozo Tubería Forzada.

La excavación fue realizada por el método de perforación y voladura, en la cual todos los procesos fueron manuales, a excepción de la extracción que fue realizada mediante el uso de equipo mecánico.

La extracción debido a la sección transversal fue realizada por una mini excavadora hidráulica, la cual recogía todo el material suelto que se obtiene después de realizar la voladura y lo introducía en un balde para sacar el material al patio de escombros.



Ilustración 3. Mini excavadora utilizada en Pozo Tubería Forzada.

El proceso de extracción fue realizado mediante el uso de un balde "cilíndrico" de las siguientes dimensiones:  $\phi = 1,10\text{m}$ ,  $h = 0,90\text{m}$ ; es decir, un balde con una capacidad de  $0,856 \text{ m}^3$  aproximadamente.



Ilustración 4. Balde en proceso de extracción. Pozo Tubería Forzada.

Para la extracción con balde se contó con una grúa de capacidad de 65 toneladas, la cual no solamente se utilizaba para esto, sino que también fue utilizada para movilizar a los trabajadores, piezas de los arcos, la maquinaria, equipos manuales, materiales de apoyo, mangueras, conductos y otros.

En cuanto al soporte, se utilizaron perfiles W6x25 los cuales fueron colocados a cada metro de profundidad. Estos anillos fueron compuestos por 6 segmentos de aproximadamente 2,62 metros cada uno, formando así un anillo con una longitud de 15,71 metros.

En los primeros 10 metros de excavación, el uso de anillos de acero fue el único método de soporte, además del uso de láminas de zinc para detener la caída de material durante el proceso constructivo. Después de los 10 metros de excavación, además del uso de anillos, también se implementó el uso de concreto lanzado con malla electrosoldada.



Ilustración 5. Soporte Pozo Tubería Forzada

### Sección Irregular Pozo Tubería Forzada

La excavación de la sección irregular se realizó desde la elevación 438,227msnm y terminó en la 429,527 msnm, conformando así una diferencia de elevación de 8,70 metros.

Se comenzó el 20 de noviembre del 2011, con el ciclo número 61 de la excavación.

La construcción de la sección irregular terminó en el ciclo número 68, el 15 de diciembre del 2011, dejando la transición completamente lista para el inicio de túnel y el nivel de piso del pozo requerido.

En la excavación de esta sección se utilizaron las mismas técnicas en perforación, voladura, extracción y soporte que en la sección regular, más la diferencia radica en que por cada metro de excavación en el soporte se colocaron dos vigas rectas para ir aumentando el perímetro de la sección con el fin de crear un punto de inflexión en la tubería (PI - 13), es decir, la transición entre el pozo y el túnel.



Ilustración 6. Soporte Pozo Tubería Forzada con vigas rectas (PI - 13).

Para la construcción de este pozo se realizaron perforaciones de exploración cerca del sitio, aproximadamente a unos 15 metros del centro del pozo, estas para la creación del perfil geológico que se adjunta en la sección de anexos.

El proceso constructivo de ambas secciones (regular e irregular) se trabajó a 24 horas, con cuadrillas alrededor de 12 personas cada una y turnos de 12 horas.

## Pozo Aporte La Flor

La excavación del Pozo Aporte La Flor se realizó desde la elevación 698,051msnm y terminó en la 671,951 msnm, conformando así una diferencia de elevación de 26,1 metros.

Se comenzó el 20 de noviembre del 2011, con el primer ciclo completo de avance.

La excavación del pozo terminó en el ciclo 23, el 18 de enero del 2012.

Las técnicas utilizadas para la perforación y voladura en el Pozo Aporte La Flor fueron las mismas que se utilizaron en la construcción del Pozo de Tubería Forzada. Mediante equipo manual se barrenó alrededor de 1 metro o 1,5 metros de profundidad y se cargó con explosivo.

La extracción se realizó por igual mediante una mini excavadora localizada en el fondo del pozo, la cual cargaba un balde para que fuera sacado por una grúa bancada fuera del pozo



Ilustración 7. Proceso de extracción. Pozo Aporte La Flor

El diámetro del pozo fue de 6 metros. En el proceso de soporte, al igual que el otro pozo, se colocó un anillo dividido en 7 segmentos de una longitud en total de 18,85 metros lineales, con una distancia de separación de anillos de 1 metro.

Además de los anillos utilizados, se colocó malla electrosoldada y concreto lanzado (vía seca), a partir del quinto metro de perforación, evitando así problemas de infiltración con el uso de estas dos técnicas adicionales



Ilustración 8. Colocación concreto lanzado. Pozo Aporte La Flor

Durante el proceso de excavación del Pozo Aporte La Flor, se tuvo problemas geotécnicos con los terrenos aledaños a la propiedad, debido a problemas de saturación de suelos causados por las lluvias de la época, por lo que en este sitio de trabajo se tuvo que detener las labores en repetidas ocasiones por la seguridad de los trabajadores.



Ilustración 9. Talud cercano al Pozo Aporte La Flor

Cuando la excavación del pozo del aporte La Flor terminó y se iniciaron labores de ampliación del túnel de conducción principal y de limpieza del mismo.

Este pozo de aporte se ubicó justo sobre la línea de centro del túnel principal en la estación 3+342 y aportará aproximadamente 1,8 m<sup>3</sup>/s al caudal de diseño del proyecto.

## Túnel Tubería Forzada

La excavación del Túnel de Tubería Forzada comenzó el 17 de diciembre del 2011.

Comenzó con el primer arco en una elevación de 428,082 msnm y en las coordenadas 509.212,506 en "x" y 257.210,793 en "y"; terminando en el bifurcador de Casa de

Máquinas a una elevación de 418,700 msnm, en las coordenadas 509.236,369 en "x" y 257.425,843 en "y" con una longitud total de túnel de 220,620 metros lineales.

La excavación del Túnel de Tubería Forzada terminó el 24 de abril del 2012, con la culminación del ciclo 144.

La excavación de este túnel se hizo empleando las mismas técnicas de los dos pozos anteriores, es decir, mediante perforación y voladura.



Ilustración 10. Martillos perforadores manuales.

El mecanismo de extracción del escombro se realizó algunas veces con 1 mini cargador conocido como "Bobcat" y otras veces con 2 o 3 mini cargadores.

Para el retiro total del escombro del túnel, un mini cargador colocaba en un balde el escombro y este era transportado por una grúa hacia la superficie, atravesando el pozo de tubería forzada



Ilustración 11. Mini cargadores utilizados en extracción. Túnel Tubería Forzada

Durante la excavación de este túnel, se emplearon 4 grúas diferentes, por motivos de desperfectos mecánicos en ellas, más todas fueron grúas con una capacidad mucho mayor a

la capacidad requerida. Las grúas utilizadas fueron una Link-Belt HTC-8665, una Link-Belt RTC-8090, Liebherr LTM1055 y American HC1465.

Los primeros 4 metros de excavación de túnel fueron una etapa de transición, en la que se reducía la altura del mismo por lo que disminuía la sección del tope.

El mecanismo de soporte en estos primeros 4 metros consistía tanto en arcos de acero como con malla electrosoldada y concreto lanzado. Después de los 4 metros solamente se colocaban arcos de acero y a partir de los 187,57 metros de excavación no se utilizó ningún tipo de soporte, quedando la roca desnuda.

Las vigas utilizadas en el soporte de arco correspondían a perfiles W6x25, colocados en cinco segmentos a cada 1,5 metros de avance. Estos fueron colocados como se aprecia en la siguiente ilustración:



Ilustración 12. Arcos utilizados en Túnel Tubería Forzada



Ilustración 13. Colocación primer arco Túnel Tubería Forzada.

Aunque en los resultados no se ve reflejado el cambio de horarios en los grupos de trabajo que se efectuó, durante la excavación del túnel se

hizo un reajuste de los horarios de trabajo y se pasó de cuadrillas de 12 horas a cuadrillas de 8 horas en tres turnos.

Estos cambios de horario en las cuadrillas, permitieron una reducción del tiempo de cada ciclo de excavación, la mayoría de después del ajuste, cada cuadrilla realizaba un ciclo completo, cuando anteriormente se utilizaban alrededor de 15 horas o más.

## Análisis estadístico

Para cada actividad de cada frente de trabajo se presenta una tabla y un gráfico. Esta tabla muestra un resumen estadístico de cada una. Incluyen medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma.

De gran interés aquí son el sesgo estandarizado y la kurtosis estandarizada, quienes pueden utilizarse para determinar si la población sigue una distribución normal.

Si alguno de estos dos datos estadísticos se encontraran fuera del rango de -2 a +2, indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar la desviación estándar.

En los casos de que el valor del sesgo estandarizado y la kurtosis estandarizada se encuentren dentro de los rangos esperados, se puede decir que los datos provenían de una distribución normal.

Cuando se dieron casos de que estos valores no presentaron una distribución normal, se procedió a eliminar datos extremos de las muestras hasta alcanzar la distribución buscada. Esto para poder dar como confiables los datos que se obtuvieron.

Una vez catalogada como distribución normal, se tomaron los valores de media (promedio ponderado), mínimo y máximo para con ellos utilizar la ecuación 2 que se expresó en el marco teórico y se determinó el valor PERT para cada actividad.

Se decidió utilizar PERT a diferencia del promedio ponderado, porque este valor no solamente toma el promedio ponderado, sino también el valor mínimo y el valor máximo de la población, es decir, contempla tanto el tiempo optimista como el pesimista de la actividad.

Para el análisis estadístico del Pozo Tubería Forzada, en su sección regular, la modificación de la muestra de datos fue poca, por

lo que esto indica que la mayoría de datos se mantuvieron cerca de la normal.

Para esta sección regular, en la mayoría de las actividades contaban con una cantidad considerable de datos, con excepción de limpieza de huecos que el conteo total fue de 7 datos.

Las actividades de desconche, barrenación y colocación de pernos no contaban con ningún dato registrado.

En cuanto a la comparación con los rendimientos esperados, se puede ver que el acomodo de equipo y el sacar este mismo, fueron actividades más eficientes de lo que se suponía, al igual que la colocación de malla electrosoldada, que fue colocada un poco más rápida. La barrenación es una actividad que consumió el doble del tiempo de lo que se esperaba.

De particular interés tenemos el rendimiento de la extracción, esta debido a que a diferencia de las otras actividades, sí varía conforme pasan los ciclos, ya que la profundidad va en aumento y el tiempo de empleo de la grúa es proporcional a esta.

Esto quiere decir que no es lo mismo extraer en los primeros metros de excavación en el cual el balde de extracción puede ser sacado en pocos segundos, a diferencia de extraer en los últimos metros de profundidad los cuales tarda mucho más.

En el análisis de la sección irregular del Pozo Tubería Forzada, se tenían con máximo 9 datos por actividad (un dato por cada ciclo). ≠ La mayoría de las actividades fueron poco modificadas ya que no tenían que hacerse ningún ajuste para que siguieran una distribución normal.

Se repite el hecho de que el acomodo y retiro de equipo siguen siendo una actividad que se había subestimado, a diferencia del proceso de barrenación, el cual tuvo una duración de alrededor 4 veces lo que se había estimado.

De las actividades de carga y voladura, en ambas los resultados estuvieron cerca del estimado, por lo que los valores iniciales se podrían tomar como válidos si se piensan aplicar en obras futuras, ya que sí se encuentran muy próximos a una distribución normal.

Para el proceso de extracción del material, nuevamente se obtiene un valor muy elevado si se compara con el dato estimado. Según los resultados se obtuvo que la extracción se realizara en 0,07 m<sup>3</sup>/min,

Si a este resultado de extracción se aplica la razón inversa, se obtienen 14,28 min por un metro cúbico extraído, lo cual es un valor bastante razonable para las condiciones de trabajo.

El balde con el que se trabajó (aproximadamente 0,86 m<sup>3</sup>) y el empleo de la grúa, transportando el balde desde la superficie a una profundidad que osciló de los 61,5 a 70 metros, justifican los 14,28 min para sacar menos de un metro cúbico de escombros.

La colocación de soportes duró alrededor del 50% más de lo esperado. Se puede atribuir que en la colocación del anillo durante toda esta transición se tuvieron que adaptar dos vigas rectas en sentido norte – sur a la circunferencia original. La introducción de estas vigas rectas, produjeron que conforme aumentaba el pozo su profundidad, más grande eran las dos piezas que se colocaban.

En materia de construcción de pozos, el Pozo Aporte La Flor fue el que sus actividades estuvieron más cercanas a lo planeado. Por ejemplo, la barrenación sólo ocupó un 36% más del tiempo estimado, al igual que las actividades de conexión y voladura las cuales fueron bastante eficientes en su proceso.

De igual manera, la colocación de los soportes fue bastante similar al tiempo estimado. La malla electrosoldada fue levemente más rápida y la colocación de concreto y anillo ligeramente retrasada.

Analizando visualmente la mayoría de las gráficas normales de este pozo, se puede visualizar como en muchos casos la distribución sigue una tendencia escalonada, esto debido a los problemas de estabilidad de los taludes cercanos, como se había mencionado. Este “paro de labores” produjo un proceso de reaprendizaje en los grupos de trabajo, lo que se puede ver reflejado en las gráficas.

Las diferencias obtenidas entre el Pozo Tubería Forzada y Pozo La Flor podrían atribuirse a diferentes factores como: diámetros y profundidades, personal, condiciones de sitio, entre otros.

Por parte del Túnel Tubería Forzada se cuenta con una población de datos significativamente grande, en comparación con los pozos anteriores, los cuales fueron sometidos a poca modificación, obteniéndose una distribución normal.

Las actividades de mayor demanda de tiempo al igual que todas las demás, con excepción del acomodo de equipo, conexión y voladura y la colocación de malla, obtuvieron resultados mayores a los esperados. Esto se pudo ver reflejado en el tiempo de entrega de este frente de trabajo, el cual fue terminado 45 días calendario más tarde de lo que se había planeado.

# Conclusiones

- La barrenación y la extracción del material son las actividades que obtuvieron un valor mucho mayor al estimado.
- Las actividades de acomodo, retiro de equipo y la colocación de soportes son las actividades que obtuvieron un valor más cercano al valor estimado.
- La extracción del material es la actividad que más tiempo consume en un ciclo de excavación subterránea.
- Se identifican la barrenación, extracción de material y colocación de anillo o arco, como las actividades más críticas del proceso.
- La profundidad de un pozo es inversamente proporcional a su eficiencia en extracción de material.
- El aumento de la sección transversal de un pozo, influye proporcionalmente en la determinación de tiempos de barrenación.
- La mano de obra y utilización de equipos del Pozo Aporte La Flor fue más eficiente que los mismos del Pozo de Tubería Forzada en su sección regular.
- Los tiempos de espera de los trabajadores y retrasos en las labores, se reflejan como curvas escalonadas en una distribución normal.
- La utilización de 3 cuadrillas a 8 horas cada una en lugar de 2 cuadrillas a 12 horas cada una disminuye el tiempo de un ciclo de excavación.
- El uso del PERT y no del promedio ponderado en la planeación de futuras actividades de proyecto, se traduce como un rendimiento pesimista para las para estas, dando opción a holguras en el proyecto durante su ejecución.

# Recomendaciones

- ✓ Utilizar la mayor cantidad de máquinas barrenadoras que se puedan acomodar en la sección de trabajo.
- ✓ Realizar una buena limpieza de huecos y un buen procedimiento en la carga de explosivos, obtendría la mayor eficiencia en las voladuras y así se evitaría el gasto innecesario de explosivos.
- ✓ Realizar un desconche apropiado para poder lograr una colocación de soporte eficiente, sin atrasos.
- ✓ Utilizar dos o más cargadores para aligerar el proceso de extracción.
- ✓ Utilizar un balde de máxima capacidad, según la grúa que se esté usando, para lograr una extracción más rápida.
- ✓ Determinar qué sistema de soporte es adecuado para evitar utilizar sistemas que pueden no ser necesarios.
- ✓ Utilizar grupos de trabajo de 8 horas y un proceso 24 horas continuas, en modo bisemanal.
- ✓ Utilizar un buen sistema de bombeo de agua para facilitar las condiciones de trabajo y hacer que el ciclo sea más eficiente.
- ✓ Utilizar para la planeación de obras datos que hayan sido depurados mediante un análisis estadístico y no simplemente una toma directa de promedios ponderados.

# Apéndices

Apéndice 1  
Datos Pozo Tubería Forzada – Sección Regular

Apéndice 2  
Datos Pozo Tubería Forzada – Sección Irregular

Apéndice 3  
Datos Pozo Aporte La Flor

Apéndice 4  
Datos Túnel Tubería Forzada

Apéndice 5  
Hoja Electrónica - Resumen Rendimientos

# Anexos

Anexo 1.  
FORMULARIO DE TRABAJO - EXCAVACIÓN DE POZOS - F09 - CAP – P y C - 05

Anexo 2.  
FORMULARIO DE TRABAJO - EXCAVACIÓN TÚNEL - F10 - CAP – P y C - 05

# Referencias

1. Tapia, A. 1999. **TOPOGRAFIA SUBTERRÁNEA**. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España: Ediciones UPC, S.L.
2. Puerto, J. 2002. *Túneles Viales*. **PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA**. Construcción de Túneles.
3. Rojas, S. 2009. Túneles. **UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**. Facultad de Ingeniería. Venezuela.
4. Twine, D. 2004. Cut-and-Cover Tunnels. **THE ARUP JOURNAL**. United States of America. 1/2004, pp. 29 – 32.
5. Maidl, B; Schmid, L; Ritz, W; Herremkmecht, M. 2008. Hardrock **TUNNEL BORING MACHINES**. E&S Series. John Wiley & Sons Inc
6. De la Sota Pérez, G. 2007. Proyecto y construcción de túneles. **COLEGIO DE INGENIEROS DEL PERÚ**. Centro de Actualización Profesional en Minería.
7. Carías, C. 1995. **VOLADURAS DE ROCAS**. Costa Rica. Instituto Costarricense de Electricidad.
8. Hoek, E; Brown, E.T. 1988. **EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS EN ROCA**. México. McGraw Hill.
9. Walpole, R; Myers, R; Myers, S. 1999. **PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA PARA INGENIEROS**. Sexta Edición, México. Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A.
10. Hinze, J. 2008. **CONSTRUCTION PLANNING AND SCHEDULING**. Columbus, Ohio, United States of America. Pearson Education