



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**SEGUIMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE  
AFECTAN EL RENDIMIENTO EN LA EXCAVACIÓN DEL  
TÚNEL DE CONDUCCIÓN DEL PROYECTO  
HIDROELÉCTRICO TZ 2**

Juan Pablo Aguilar Aguirre

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental  
Medellín, Colombia  
2021



**SEGUIMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE AFECTAN EL  
RENDIMIENTO EN LA EXCAVACIÓN DEL TÚNEL DE CONDUCCIÓN DEL  
PROYECTO HIDROELÉCTRICO TZ 2**

Juan Pablo Aguilar Aguirre

Informe de práctica como requisito para optar al título de:  
Ingeniero civil

Asesores

Sebastián Sepúlveda Cano. Ingeniero Civil  
Beatriz Elena Sepúlveda Acevedo. Ingeniera Civil

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental  
Medellín, Colombia  
2021.

## RESUMEN

El presente trabajo, corresponde a la experiencia vivida en obra para la modalidad que concierne al semestre de industria. Este documento, tiene como objetivo principal, el análisis de las actividades que afectan en mayor medida el proceso de excavación del túnel de conducción en el proyecto Hidro TZ2. Para ello, tanto la observación in situ, como los registros históricos de los avances diarios son imprescindibles.

Además, con la finalidad de establecer la importancia de un seguimiento diario en el proceso de excavación, se proyectan tres escenarios diferentes y se comparan con el avance real, con la intención de examinar en qué estado se encuentra el progreso del túnel.

Por otra parte, se grafican secciones transversales propias de tres tramos con características diferentes, en las cuales el tipo de roca corresponde a clasificaciones tipo I, II y IV. Esto, con el propósito de determinar la influencia del tipo de roca en la sobreexcavación producida posterior a una voladura.

Finalmente, como anexo al trabajo actual, se presenta el diseño de un diagrama de barrenación y se exponen las variaciones, entre el diagrama anterior y el originado a partir de las modificaciones implementadas mediante un trabajo conjunto con el ingeniero residente.

### 1. INTRODUCCIÓN

Todos los procesos constructivos en ingeniería deben tener un seguimiento riguroso, el cual abarca desde la ejecución de la actividad, hasta su traducción a datos numéricos reales, siendo estos, un indicativo claro de la eficiencia con la que se está llevando a cabo una determinada labor. El hecho de contar con datos organizados y claros, permite un mejor entendimiento de la influencia de ciertas actividades en el proceso, así como la toma de decisiones basadas en los registros cuantitativos y cualitativos de los procedimientos analizados.

La excavación de un túnel no es la excepción, ya que es un proceso en el que las actividades correspondientes a su ciclo constructivo, tienen influencia directa sobre la eficiencia de los avances en profundidad y, por consiguiente, en los periodos estipulados inicialmente. Además, variables que abarcan desde fallas geológicas, problemas asociados a la evacuación de niveles freáticos, averío de maquinaria, voladuras heterogéneas, experiencia del constructor, elección de maquinaria, entre otras; hacen que esta actividad pueda tornarse compleja o, por el contrario, ser exitosa y cumplir con los objetivos preestablecidos.

La empresa Excavaciones Subterráneas y Tratamientos. S.A.S, tiene como actividad principal, la excavación de túneles de pequeña, mediana y gran sección [1]. Incluye así mismo, todas aquellas obras indispensables en dicho proceso. En la actualidad, la empresa está llevando a cabo el proyecto hidroeléctrico TZ 2 en el municipio de Tarazá, en el cual la conducción es desarrollada mediante un túnel con sección en forma de herradura y dimensiones de 3 m x 3 m, excavado mediante el método con explosivos.

Con relación a lo anterior, en el presente trabajo, se determinan las variaciones entre los tiempos establecidos desde la planeación del proyecto y los empleados realmente en el proceso de excavación. Paralelamente, se realizan a cabo proyecciones para la fecha de cale y se lleva a cabo la comparación con los avances reales. Además, se obtienen los volúmenes de sobreexcavación en determinadas secciones y finalmente, se plantea una discusión acerca de los posibles factores que influyeron en la magnitud de la misma.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. GENERAL

Evaluar el rendimiento en la excavación del túnel de conducción del proyecto TZ2, con el fin de promover estrategias que posibiliten la mejora de tiempos y la elevación en la productividad del proceso constructivo.

### 2.2. ESPECÍFICOS

- Recopilar experiencias tanto documentadas en la literatura como vividas in situ, que permitan el mejor entendimiento de los problemas inherentes a los procesos de construcción de túneles.
- Analizar las diferentes variables que tienen influencia directa negativa sobre el proceso de excavación y establecer un esquema metodológico, que permita efectuar intervenciones en diferentes escenarios posibles dentro de un proyecto de excavación subterránea
- Comparar el valor teórico de la excavación con el de la sobreexcavación y de esta manera, determinar las variaciones que se producen a causa de distintos factores a lo largo del abscisado del túnel.

## 3. MARCO TEÓRICO

La excavación de túneles, es una actividad que puede ser llevada a cabo mediante diversos métodos constructivos y su elección, depende de factores tales como el tipo de terreno a excavar y su longitud [2]. Una de las técnicas convencionales que aun en la actualidad tienen aplicación, es el sistema de perforación y voladura. Es un método que presenta gran versatilidad frente a las secciones de excavación y los tipos de roca, ventajas en cuanto a la movilidad de los equipos así como una reducida inversión inicial, entre otras [3]. En el proyecto actual, a pesar de que la perforación es llevada a cabo mediante un Jack-Leg, quien emplea su fuerza física para dicho propósito, es un operario, lo que lo convierte en cierta medida en un proceso manual [4].

Ahora bien, considerando que el proceso de excavación se está ejecutando mediante un sistema de arranque con explosivos, es importante dejar claro que este, difiere al avance mecánico. Una de las diferencias entre ambos, es que, con el método de voladura, se obtienen secciones más irregulares y el macizo rocoso puede presentar alteraciones si no se emplea el diagrama de voladura adecuado [3]. Se debe dejar consignado, que la sobreexcavación producida en el proceso de excavación, está ligada fuertemente a los mecanismos correspondientes a la rotura de la roca y que se desarrollan en la etapa de voladura [5].

Factores como el diaclasamiento y fisuras naturales de las rocas, generan irregularidades en el nuevo frente generado. Por lo tanto, una buena planificación basada en el grado de fisuramiento de la roca, la orientación de los sistemas de diaclasas y otros aspectos geológico-estructurales, disminuye la sobreexcavación producida por la voladura [6]

Por otra parte, el ciclo básico de excavación, es aquel que se compone de manera ordenada por las actividades de perforación, carga de explosivos, voladura, ventilación, saneo o desabombe, rezaga o desescombro y finalmente, tratamientos de soporte en aquellos tramos que así se requiera [7]. La Figura 1 representa lo anterior.



Figura 1. Operaciones básicas en el ciclo de excavación con explosivos. Recuperado de: C. López Jimeno  
MANUAL DE TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS

Como se puede observar en la Figura 1, las actividades tienen dependencias entre sí, esto quiere decir que, si se altera una de ellas las demás se verán afectadas de manera directa y, por lo tanto, el tiempo del ciclo aumentará o disminuirá según sea el caso. Por lo anterior, se hace indispensable llevar un seguimiento cuidadoso del avance diario, el cual permite hacer un pronóstico de la eficiencia de la actividad y bien, tomar decisiones tales como dar continuidad o modificar el proceso, con el fin de obtener mejores resultados.

Dado que el ciclo se repite cada que se logra un avance en profundidad, cabe resaltar que dicha profundidad, dependerá de las características del macizo rocoso, tales como la fracturación, la esquistosidad, la estratificación, entre otras [8]. Además, bajo una condición en la que los barrenos cargados no superen una desviación equivalente al 2% de la profundidad, el avance por quema puede llegar a alcanzar el 95% de la perforación [9].

Una forma práctica de visualizar el proceso de excavación es mediante un diagrama de Gantt, aplicable a proyectos sencillos en cuanto a su comprensión [10]. Además, permite apreciar la secuencia de las actividades y su duración, sin importar la unidad de medida temporal con la que se esté trabajando.

Además de la utilización del diagrama de Gantt para representar el ciclo constructivo, aparecen las líneas de balance como una opción de representación más global, mediante las cuales, es posible visualizar el patrón de avance en profundidad. Esta metodología, permite una comprensión gráfica de los avances para cada uno de los dos frentes sin describir a detalle las actividades, sin embargo, es una buena alternativa para analizar la variabilidad en la eficiencia a lo largo del tiempo. Los cambios en las pendientes de cada línea, dan razón de la velocidad con la que se está llevando a cabo el proceso y de esta manera, es posible determinar si el tiempo empleado supera o se encuentra por debajo del previsto [11].

## **4. METODOLOGÍA**

La metodología a emplear se compone de tres fases fundamentales, las cuales se definen a continuación.

### **4.1. REVISIÓN DE LITERATURA**

En esta etapa, se recurre a la búsqueda de información relacionada con los rendimientos en los procesos constructivos de túneles, los fundamentos teóricos que rigen el proceso de excavación, la forma en la que se pueden mejorar los procesos, los tipos de problemas comunes en esta actividad y las soluciones que puedan implementarse. Lo anterior, como herramienta que permita una mejor comprensión a priori y por ende la extrapolación del conocimiento al procedimiento.

### **4.2. RECOPIACIÓN DE DATOS REALES DEL PROYECTO**

La etapa de recolección, tiene como objetivo la adquisición de información del proyecto que ha sido documentada y en la cual se presentan datos tales como: avances en el proceso de excavación, tiempo que tarda un ciclo completo en la actividad y los imprevistos que surgen en el día a día y que han generado modificaciones temporales a lo largo del intervalo seleccionado.

### **4.3. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA**

De la información inicial del diagrama de Gantt del proyecto, se extraen las tareas correspondientes a la excavación del túnel tanto en Portal Entrada como en Portal Salida, además, se grafica el avance real empleando igualmente diagramas de Gantt. El objetivo de esto, es comparar los tiempos reales con los establecidos al inicio y de esta manera, detectar las variaciones temporales que se han producido a causa de diferentes factores propios del proyecto.

Paralelamente, mediante el registro correspondiente a los avances diarios, se proyectan tres escenarios posibles para el canteo entre frentes (optimista, intermedio y pesimista) y posteriormente, se grafican por medio de líneas de balance. Así, es posible cotejar las proyecciones con los avances diarios del proyecto. Lo anterior, con el fin de llevar un seguimiento que permita concluir, cuál de las tres alternativas se asemeja en mayor medida al proceso de excavación real.

Finalmente, por medio del software Civil 3D, se determinan los volúmenes de sobreexcavación en ciertas secciones del túnel y se comparan con los valores teóricos. Con los resultados obtenidos, se analizan los posibles factores que pudieron influir en la ocurrencia de esto.

## **5. PLANTEAMIENTO DE ESCENARIOS**

### **5.1 CRONOGRAMA GENERAL DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO TZ 2**

El hecho de contar con un cronograma real de las actividades del proyecto hidroeléctrico TZ 2, es imprescindible, si el objetivo es llevar a cabo un seguimiento y posterior comparación entre los avances reales y los esperados. Por este motivo, se representa por medio de la Figura 2, un extracto del cronograma del proyecto, para la sección correspondiente a la excavación del túnel tanto en Portal Entrada como en Portal Salida.



En dicho cronograma, es posible apreciar que la excavación del túnel se presenta como un proceso independiente, el cual se supone, no debe ser afectado por los demás procedimientos llevados a cabo. Sin embargo, tiene influencia directa sobre algunas labores, ya que, de su finalización depende, que ciertas actividades puedan ser ejecutadas de manera inmediata o por el contrario, se pospongan hasta que las condiciones permitan su desarrollo.

## **5.2 DEFINICIÓN DE ESCENARIOS PARA EL CALE ENTRE FRENTES**

Teniendo en cuenta los limitantes en cuanto a la información preliminar, acerca del tipo de roca a lo largo de los 2246.6 m del túnel, es indispensable que el personal encargado de la excavación lleve a cabo el reconocimiento visual del mismo, a medida que se avanza en profundidad. Sin embargo, considerando la incertidumbre generada por la clasificación del terreno excavado, el planteamiento de diferentes alternativas en las que se proponen distintos escenarios, permite tener una perspectiva más amplia en caso de presentarse uno u otro caso. De esta manera, es posible llevar un control del tiempo para el cumplimiento de la actividad en el plazo estipulado.

Dado que el frente Portal Entrada se encuentra aún en roca tipo V, el planteamiento de los escenarios está influenciado por tal condición. Con los registros disponibles sobre los rendimientos en roca tipo I en el frente Portal Salida, se pretende la extrapolación de la información, a la excavación respectiva al frente Portal Entrada, cuando este se encuentre en un tipo de roca similar. Por lo tanto, los tres escenarios mencionados, se plantean para tres profundidades distintas en Portal Entrada, en las cuales se supone, se localizará roca tipo I.

El día 20 de septiembre del año 2020, es la fecha empleada como punto de partida para el planteamiento de los escenarios, optimista, intermedio y pesimista.

Para esta fecha, el proceso de excavación presenta las características que se describen a continuación:

- La abscisa en la que se halla el frente correspondiente a Portal Salida, es el km 1+960,2. En este punto, la clasificación del macizo, hace referencia a roca tipo I. Por otra parte, se dispone de un ambiente seco, es decir, sin flujos de agua visibles en el frente de ataque o de perforación.
- En el caso del frente Portal Entrada, a pesar de algunas variaciones que se han producido en la clasificación de la roca a lo largo del recorrido, para la fecha se cuenta con roca tipo V. Este tipo de roca, requiere de tratamientos inmediatos en algunos casos, lo que repercute de manera directa en los rendimientos de excavación. La abscisa en este caso, es el km 0+064.30.

Por otra parte, se definen las condiciones que rigen las proyecciones de los escenarios, para las diferentes profundidades de análisis, en las cuales se supone, se hallará roca tipo I en el frente Portal Entrada.

### **5.2.1. ESCENARIO OPTIMISTA**

- Se consideran 4 voladuras por día en el caso de roca tipo I. La elección del número seleccionado de quemas por día, se lleva a cabo, partiendo del hecho de que este valor, ha



sido el máximo número de voladuras que se ha conseguido durante el tiempo de excavación del túnel de conducción.

- El avance por voladura es de 1,52 m en roca tipo I, equivalente al 95% de la perforación, la cual tiene una profundidad de 1,6 m. Dicho valor, se elige a partir de las teorías de diseño de diagramas de perforación, en las cuales, se considera que el avance de la voladura no alcanzará el 100% de efectividad. Lo anterior, debido a diferentes factores tales como: desviación de los barrenos, variación entre la profundidad de perforación real y teórica, entre otros.
- El avance en roca tipo V, se considera de 1,2 m y en este, se llevará a cabo únicamente una voladura por día. Este valor, se selecciona a partir del registro de los avances reales, ya que, en este tipo de roca, la barrenación se ha llevado a cabo a una profundidad de 1,2 m. Además, en ocasiones ha alcanzado el 100% de la efectividad, debido a las condiciones inherentes a este tipo de roca.

Por otra parte, la elección de una quema por día, deriva del hecho de que en el frente Portal Entrada, únicamente se ha laborado una jornada, debido a la carencia de equipos y condiciones que permitan la implementación tanto del turno diurno como nocturno. Sin embargo, según la dirección de la obra, al entrar en contacto con roca tipo I, tanto el personal como los equipos necesarios, estarán a disponibilidad del frente para llevar a cabo labores en jornada continua.

Por medio de la Tabla 1, se presentan los datos empleados en las proyecciones del escenario optimista.

Tabla 1. Consideraciones empleadas en el escenario optimista

Frente	Roca	N° Voladuras	Avance (m)
Portal Entrada	I	4	1,52
Portal Entrada	V	1	1,20
Portal Salida	I	4	1,52

## 5.2.2. ESCENARIO INTERMEDIO

En el caso del escenario intermedio, las consideraciones son las siguientes:

- Se definen 3 voladuras por día para roca tipo I. Dicho valor, se debe a que, por las posibles alteraciones que se presentan en el día a día, el ciclo de excavación puede verse afectado y retrasarse, lo que deriva en un comienzo tardío para la barrenación y posterior voladura del frente de ataque.
- El avance por voladura es de 1,52 m, similar al del escenario optimista. Sin embargo, la variación entre estos, se encuentra ligada más a los retrasos en el ciclo, que a la efectividad del disparo como tal.
- Para el avance en roca tipo V, al igual que en el caso optimista y bajo las mismas consideraciones de este, se consideran 1,2 m, en el cual se llevará a cabo únicamente una voladura por día.

Los datos empleados para las proyecciones correspondientes al escenario intermedio, se muestran a continuación en la Tabla 2.

Tabla 2. Consideraciones empleadas en el escenario intermedio

Frente	Roca	N° Voladuras	Avance (m)
Portal Entrada	I	3	1,52
Portal Entrada	V	1	1,20
Portal Salida	I	3	1,52

### 5.2.3. ESCENARIO PESIMISTA

Finalmente, el escenario pesimista, hace alusión a aquellos rendimientos que se encuentran por debajo de los esperados. Además, considera mediante la disminución en el número de voladuras, que el avance acumulado por jornada tendrá una magnitud mínima, comparada con los escenarios previamente definidos. Cabe mencionar que, a pesar de no evidenciarse de forma explícita los factores que influyen en la disminución del rendimiento, una buena alternativa para atender la reducción en los mismos, es afectar la magnitud del avance por voladura con el fin de obtener una menor o mayor profundidad según sea el caso.

A continuación, se exponen las consideraciones pertinentes al escenario pesimista:

- Se definen 2 voladuras por día para el caso roca tipo I. La elección de este valor, corresponde a los datos consignados en el registro de obra, ya que, en determinadas fechas se presentó dicho rendimiento, por motivos como el averío de equipos y maquinaria indispensables para la actividad.
- El avance por voladura es de 1,52 m, tal y como en los escenarios anteriores. Dicho avance, pretende que la proyección se lleve a cabo con la misma profundidad. Sin embargo, como se justificó anteriormente, el número de voladuras es quien define el avance de excavación acumulada por jornada.
- Finalmente, para el avance en roca tipo V, al igual que en los escenarios anteriores, se consideran 1,2 m.

A continuación, se presentan los datos empleados para las proyecciones correspondientes al escenario pesimista, en la Tabla 3.

Tabla 3. Consideraciones empleadas en el escenario pesimista

Frente	Roca	N° Voladuras	Avance (m)
Portal Entrada	I	2	1,52
Portal Entrada	V	1	1,20
Portal Salida	I	2	1,52

## 6. RESULTADOS

Establecidas las consideraciones para cada escenario, se llevan a cabo las proyecciones del cale entre frentes, para tres profundidades diferentes de localización de roca tipo I en Portal Entrada, 80 m, 90 m y 100 m. Es importante, abarcar diferentes alternativas, ya que, de esta manera es posible examinar las variaciones del tiempo proyectado y la influencia del tipo de terreno. Los resultados obtenidos para las profundidades de análisis se presentan a continuación por medio de la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados para las proyecciones de los escenarios propuestos

ESCENARIO OPTIMISTA				
Frente	Profundidad roca tipo I (m)	Distancia restante (m)	Fecha de cale	Abscisa
Portal Salida	80	982.11	1/03/2021	km 0+978.09
	90	1001.63	4/03/2021	km 0+958.57
	100	1021.15	7/03/2021	km 0+939.05
Portal Entrada	80	913.79	1/03/2021	km 0+978.09
	90	894.27	4/03/2021	km 0+958.57
	100	874.75	7/03/2021	km 0+939.05
ESCENARIO INTERMEDIO				
Frente	Profundidad roca tipo I (m)	Distancia restante (m)	Fecha de cale	Abscisa
Portal Salida	80	968.11	21/04/2021	km 0+992.09
	90	984.91	24/04/2021	km 0+975.29
	100	998.35	27/04/2021	km 0+961.85
Portal Entrada	80	927.79	21/04/2021	km 0+992.09
	90	910.99	24/04/2021	km 0+975.29
	100	897.55	27/04/2021	km 0+961.85
ESCENARIO PESIMISTA				
Frente	Profundidad roca tipo I (m)	Distancia restante (m)	Fecha de cale	Abscisa
Portal Salida	80	958.99	2/08/2021	km 1+001.21
	90	968.19	5/08/2021	km 0+992.01
	100	975.55	7/08/2021	km 0+984.65
Portal Entrada	80	936.91	2/08/2021	km 1+001.21
	90	927.71	5/08/2021	km 0+992.01
	100	920.35	7/08/2021	km 0+984.65

Seguidamente, se presentan las proyecciones por medio de líneas de balance para los escenarios descritos y para las profundidades seleccionadas. La Figura 3, Figura 4 y Figura 5 representan lo anterior.

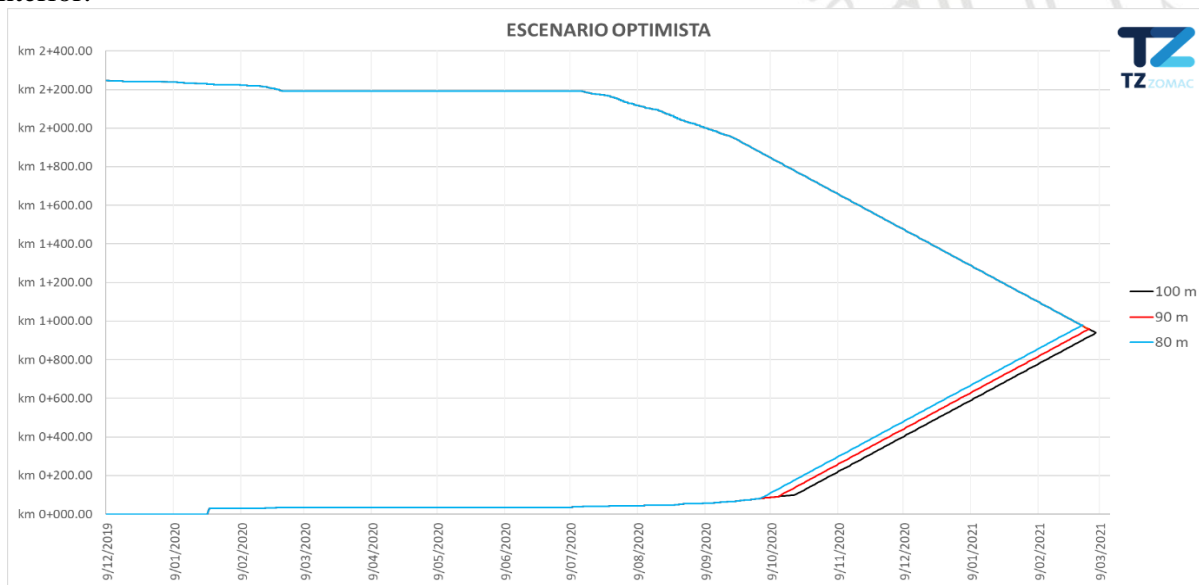


Figura 3. Proyecciones a diferentes profundidades de localización de roca tipo I, para el escenario optimista

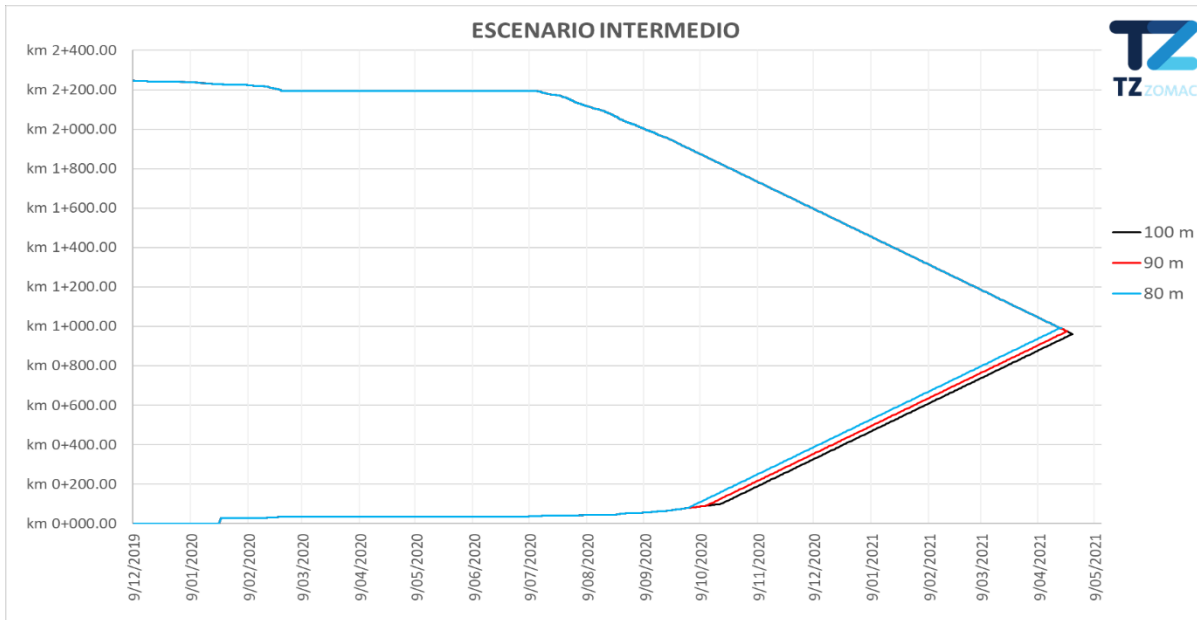


Figura 4. Proyecciones a diferentes profundidades de localización de roca tipo I, para el escenario intermedio

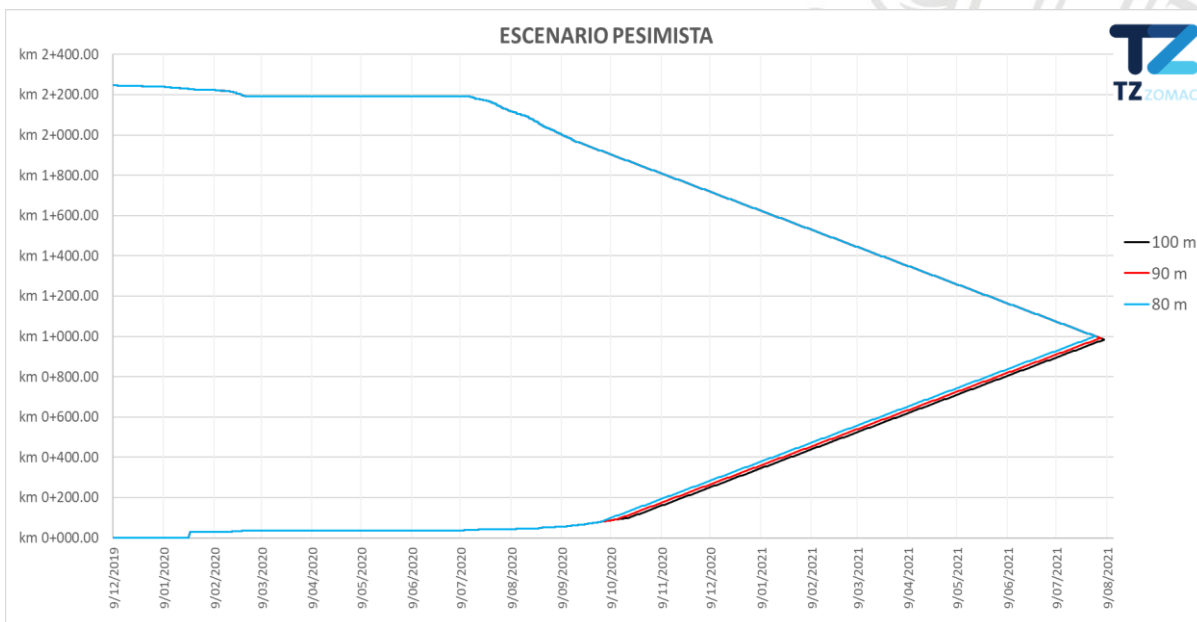


Figura 5. Proyecciones a diferentes profundidades de localización de roca tipo I, para el escenario pesimista

De acuerdo a los resultados obtenidos y según las consideraciones tenidas en cuenta para el planteamiento inicial de cada escenario, es posible apreciar la influencia del tipo de roca en el proceso de excavación. Es evidente entonces en cada caso, que a menor profundidad de localización de roca tipo I, el avance en el proceso de excavación será más acelerado.

Las gráficas para las proyecciones en los diferentes escenarios, permiten observar que cuando esto ocurre, se presenta un aumento en las pendientes de las rectas que describen el avance para cada frente, lo que deriva directamente en la reducción del tiempo de cale entre estos.

En conclusión, es de interés para el proceso de excavación, que la profundidad a la que se halle el macizo rocoso de mayor resistencia no sea significativa, ya que en este tipo de roca, los

tratamientos requeridos no precisan de grandes inversiones temporales en muchas ocasiones. Sin embargo, es preciso considerar diferentes alternativas que generen una perspectiva más amplia sobre los posibles acontecimientos que puedan ocurrir.

## 6.1. AVANCE REAL

Por otra parte, se presenta mediante la Figura 6, el avance real hasta el día 6 de diciembre del año 2020, con el fin de determinar a cuál de los escenarios propuestos se aproxima en mayor medida el proceso de excavación.

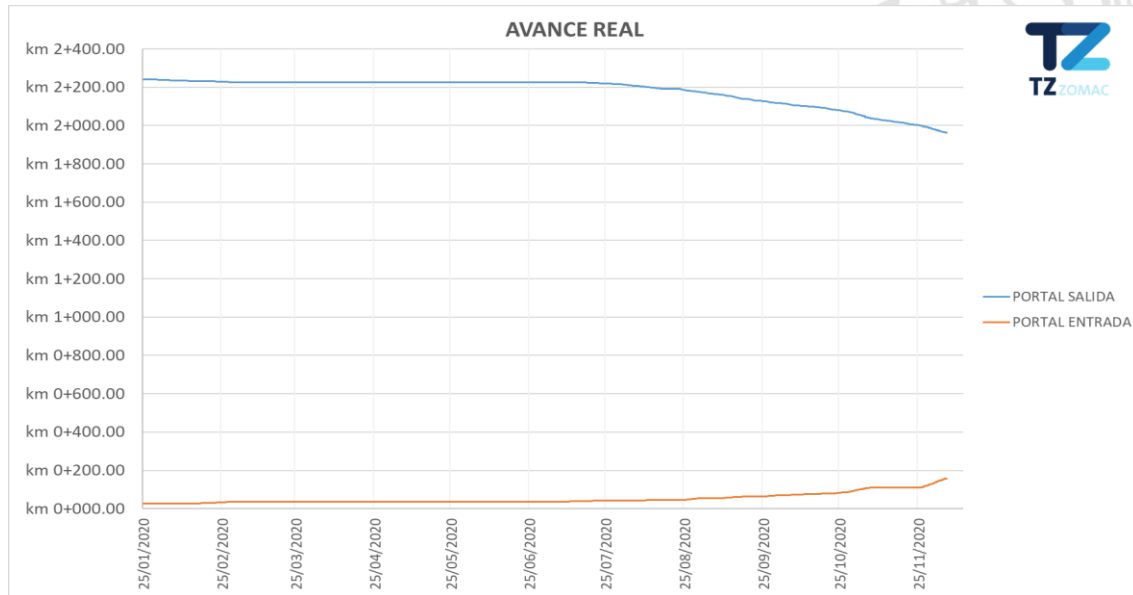


Figura 6. Líneas de balance para el avance real del túnel de conducción del proyecto Hidro TZ 2

De acuerdo al plazo estipulado para la excavación del túnel en ambos frentes, el cual se define hasta el 30 de abril del año 2021, es posible deducir que siempre y cuando el proceso de excavación se encuentre entre los escenarios positivo e intermedio, es factible cumplirlo sin inconvenientes. Esto, independiente de la profundidad a la cual se localice la roca tipo I, por lo que el margen de maniobrabilidad es mayor y genera tranquilidad en cuanto a los posibles desaciertos que se puedan presentar en el proceso. Sin embargo, una alteración desproporcionada en el mismo, puede originar afectaciones tales, que contribuyan al incumplimiento del término definido.

Por otra parte, conforme a los datos extraídos de los avances diarios, la localización de roca tipo I en el frente Portal Entrada se dio a los 58,30 m de profundidad, la cual no corresponde a ninguna de las asumidas inicialmente. Sumado a esto, otro de los imprevistos presentados durante el proceso, fue la insuficiencia de material explosivo desde el día 10 hasta el 26 de noviembre. Lo anterior, como consecuencia del suministro tardío de estos por parte de la entidad encargada de dicha labor. En este sentido, las proyecciones realizadas inicialmente, tienen aplicación únicamente en la fecha en que se realizaron, ya que las variabilidades producidas, hacen que el proceso de excavación tome una ruta diferente a la supuesta.

Adicionalmente, los resultados obtenidos permiten evidenciar la dificultad que se tiene de llevar a cabo una única estimación temporal, cuando no se tiene certeza de la geología o condiciones de frontera que rigen y condicionan el proceso de excavación. Todo esto, demuestra

la importancia de realizar proyecciones periódicamente, con el propósito de aproximarse en mejor medida a los tiempos reales y así, determinar si es posible o no cumplir con los plazos fijados al inicio del proyecto.

A pesar de las variaciones entre el avance real y los escenarios proyectados, se lleva a cabo el cálculo de la distancia promedio diaria requerida para cumplir con el tiempo establecido en el cronograma inicial. Las condiciones correspondientes a cada uno de los dos frentes se presentan a continuación mediante la Tabla 5.

Tabla 5. Estado de avance para los dos frentes el día 6 de diciembre del año 2020

Frente	Avance acumulado (m)	Fecha límite	Días restantes
P. Entrada	129.40	30/04/2021	145
P. Salida	500.60		

Conociendo el estado en el que se encuentran ambos frentes, se tiene que el avance mínimo necesario para la culminación del proceso es de 11,15 m/día como se indica en la Ecuación 1.

Ecuación 1. Cálculo del avance promedio diario necesario para cumplir con el cronograma del proyecto

$$2246,6 \text{ m} - (500,6 \text{ m} + 129,40 \text{ m}) = \frac{1616,6 \text{ m}}{145 \text{ días}} = 11,15 \text{ m/día}$$

De esta manera, se resume por medio de la Tabla 6, el estado del avance hasta el día 6 de diciembre del año 2020, asumiendo que la distancia restante para el cale se distribuye igualmente para cada uno de los dos frentes.

Tabla 6. Información correspondiente al estado del túnel de conducción a la fecha 06/12/2020

Tarea	Restante (m)	Acumulado (m)	% completado	Total (m)
Excavación por Portal Salida	808.3	500.6	38.2%	1308.9
Excavación por Portal Entrada	808.3	129.4	13.8%	937.7
				2246.6

De forma complementaria, se presenta por medio de la Figura 7, el diagrama de Gantt que describe el avance en profundidad para el proceso de excavación en cada uno de los frentes.

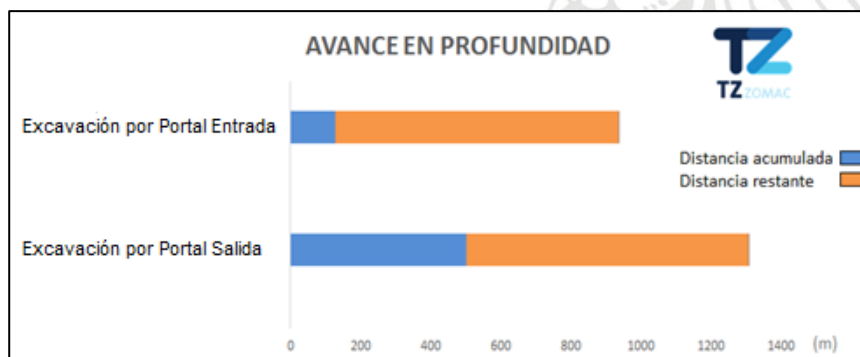


Figura 7. Estado de la excavación del túnel para ambos frentes el 06/12/2020

De esta manera, cada frente debería aportar una distancia de 5,575 m/día, la cual, si se distribuye en 4 quemas/día quedaría repartida en distancias de 1,39 m/quema.

De lo anterior, se infiere que el estado en el cual se encuentra el proyecto para la fecha, no permite grandes desajustes en el proceso de excavación para el periodo que resta. Por lo tanto, es importante supervisar de manera cuidadosa cada una de las actividades del ciclo constructivo y así, velar por el sostenimiento de un rendimiento que permita el cumplimiento del calendario definido al inicio del proyecto.

Una de las alternativas que se tiene, es disminuir la distancia en la barrenación, ya que de esta manera se aumenta la probabilidad de que la voladura sea más eficiente. Sin embargo, la cantidad de detonadores utilizados será mayor, ya que se precisa de más voladuras en una distancia similar, lo que trae como consecuencia un incremento en los costos asociados al material empleado en las mismas.

Otra de las actividades claves para que el cumplimiento del número de voladuras por día sea posible, es el hecho de contar con un equipo de rezaga en buenas condiciones, además de un operador idóneo para el mismo.

En conclusión, considerando el estado actual del proyecto, examinar diariamente y de manera cuidadosa el avance en el túnel, se convierte en una necesidad de suma importancia si se quiere alcanzar la meta de culminación para el día 30 de abril del año 2021. Por este motivo, cada una de las actividades del ciclo es determinante, ya sea en mayor o menor medida, por lo que tener una visión holística del proceso es una herramienta decisiva a la hora de tomar decisiones acertadas y en un tiempo prudente.

## **6.2. FACTORES REALES CAUSANTES DE LA DISMINUCIÓN EN EL RENDIMIENTO**

Los resultados obtenidos, son entonces una muestra clara de las variaciones que se pueden presentar a causa de diversos factores, los cuales alteran los rendimientos en el proceso de excavación. El hecho de contar con un suministro suficiente de explosivos, es una de las precauciones a considerar, sin embargo, la cantidad de los mismos no debe ser desmedida, ya que estos cuentan con un periodo de vida útil, el cual no debe ser excedido más allá de cierto umbral de tiempo para que su funcionamiento no se vea afectado.

Otra de las actividades que afectaron el rendimiento en el ciclo de excavación durante el periodo de análisis, fue el proceso de rezaga, ya que en ocasiones se vio interrumpida a causa de distintos motivos, tales como avería del equipo responsable de la actividad o incremento en el tiempo de la misma. Con todo esto, es posible deducir que, de una rápida limpieza del frente dependerá que el personal encargado de la perforación, reanude su tarea inmediatamente. Por esta razón, contar tanto con un equipo apropiado para la rezaga y en óptimas condiciones, así como con un adecuado operador del mismo, son aspectos primordiales.

Por otro lado, uno de los causantes de incremento temporal en el ciclo de excavación, es el periodo que requiere el desahume del túnel posterior a una voladura. Para ello, es indispensable poseer un adecuado sistema, compuesto por un dispositivo de ventilación acoplado a una manga, que además de agilizar el proceso de desahume, evite que el personal a cargo de la labor se vea afectado a causa de un deficiente suministro de aire. Como medida preventiva, es vital desinstalar un tramo suficiente de la manga de ventilación antes de cada voladura, con la intención de evitar daños y velar a su vez, por la durabilidad de la misma. Además, la verificación constante de la capacidad del ventilador empleado, es una práctica imprescindible.

Otro factor causante de la disminución del rendimiento, es el averío del compresor del cual se valen los Jacklegs para la perforación, por lo tanto, se debe asegurar la operatividad de estos equipos permanentemente. Adicional a esto, el suministro de un caudal constante de agua es esencial en un proceso de excavación subterránea, en el cual la combinación del líquido con el detrito producido en la perforación, permite que el material suspendido en el aire sea mínimo y que el personal implicado, pueda continuar con su actividad de manera regular.

Adicionalmente, en un periodo de tiempo determinado, la maquinaria empleada como plataforma de apoyo para la perforación, como lo era este caso el Mini Dumper, permaneció en mantenimiento. Por este motivo, se empleó el cargador de bajo perfil como reemplazo, lo que alteró el periodo de rezaga y por ende, la culminación del ciclo.

Igualmente, las variaciones en la clasificación del macizo rocoso, generan disminución en la efectividad de la quema en aquellos casos en los que el factor de carga, no aplica para la dureza característica de un determinado tipo de roca. Por consiguiente, el personal a cargo de la actividad debe realizar un análisis constante sobre la variabilidad en el tipo de roca, ya que, de esta manera, se favorece la toma de decisiones de forma inmediata. Así, es posible ajustar tanto el diagrama de perforación como el factor de carga, con el objetivo de evitar que la ineficiencia de las voladuras se prolongue por un periodo de tiempo significativo conforme se avanza en profundidad.

Recopilando los factores mencionados, es posible deducir que el proceso de excavación puede verse afectado por diversas causas, las cuales generan retardo en el comienzo de un nuevo ciclo. Por este motivo, es indispensable la observación constante tanto de la maquinaria empleada, como del equipo requerido para la labor, ya que de estos dependen tanto la eficiencia como el rendimiento en el tiempo.

### **6.3. VOLÚMENES DE EXCAVACIÓN**

En vista que, a lo largo del tiempo se presentaron cambios en el tipo de roca, una revisión de la sobreexcavación producida en diferentes clasificaciones de la misma, es una buena herramienta para examinar el comportamiento del macizo ante el proceso de excavación.

Con la finalidad de generar una discusión acerca de la influencia del tipo de roca en la sobreexcavación que se produce, se seleccionaron tres tramos diferentes de análisis. Estas longitudes fueron delimitadas por abscisas entre las cuales, la clasificación del macizo rocoso permanece invariable para cada grupo de secciones.

Inicialmente, se grafican seis secciones ubicadas dentro de una clasificación de roca tipo IV. El número de secciones, se elige adaptándose a las condiciones de la excavación en el frente correspondiente a Portal Salida, ya que a partir de la abscisa km 2+196.25 hacia abajo, la roca cambia a tipo I y de la abscisa km 2+206.28 en adelante, se da la intersección entre la ventana y el túnel. Por este motivo, analizar dicho tramo no es conveniente, ya que implica examinar secciones que han sido alteradas a causa de voladuras complementarias, empleadas para la construcción de la ventana. La Figura 8 representa lo anterior.



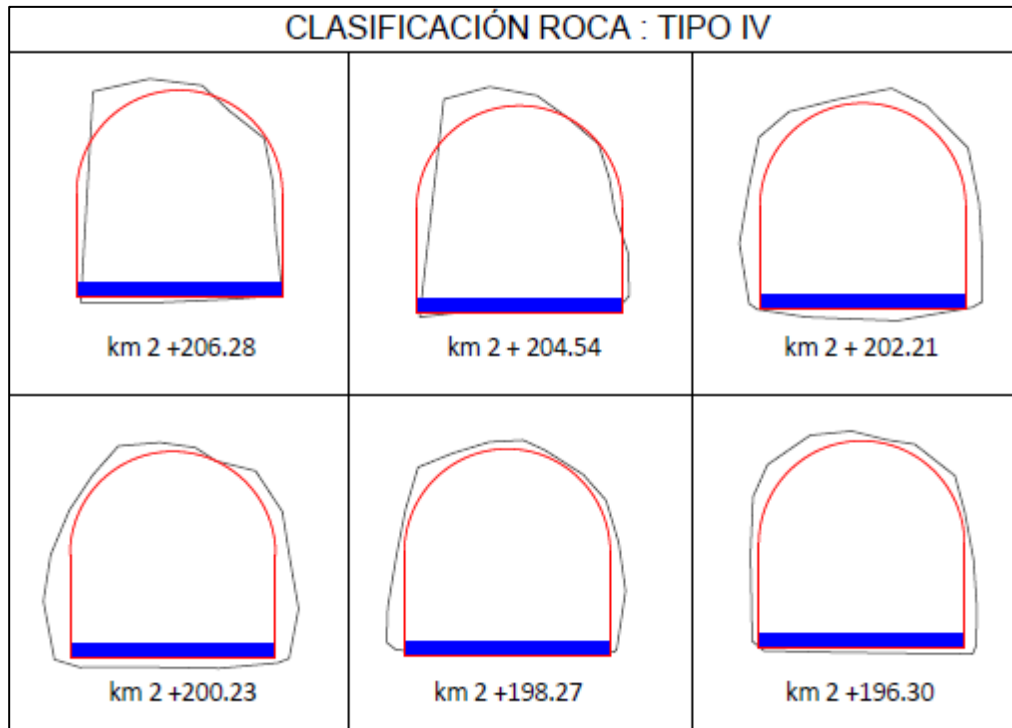


Figura 8. Secciones transversales para una clasificación de roca tipo IV en el frente Portal Salida. Elaborado por: Ing. Beatriz Sepúlveda

Los resultados obtenidos se exponen a continuación mediante la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados obtenidos para la sobreexcavación en roca tipo IV en el frente Portal Salida. Elaboración propia

Frente	Abscisa	Clasificación roca	Área teórica (m <sup>2</sup> )	Área real (m <sup>2</sup> )	Sobreexcavación (m <sup>2</sup> )	Distancia secciones (m)	Sobreexcavación (m <sup>3</sup> )	Sobreexcavación promedio (m <sup>3</sup> )
P. Salida	km 2+206.28	IV	11.57	11.70	0.13			3.42
						1.73	0.15	
P. Salida	km 2+204.54	IV	11.57	11.62	0.05	2.33	3.39	
P. Salida	km 2+202.21	IV	11.57	14.43	2.86	1.98	5.76	
P. Salida	km 2+200.23	IV	11.57	14.52	2.95	1.96	4.37	
P. Salida	km 2+198.27	IV	11.57	13.08	1.51	1.97	3.47	
						1.97	3.47	
P. Salida	km 2+196.30	IV	11.57	13.59	2.02			

Por otra parte, mediante la Figura 9 se presentan diez secciones transversales situadas dentro de una clasificación de roca tipo I, en las cuales no se presentaron dificultades con respecto a flujos de agua visibles o inestabilidades a causa de fallas en el macizo rocoso.

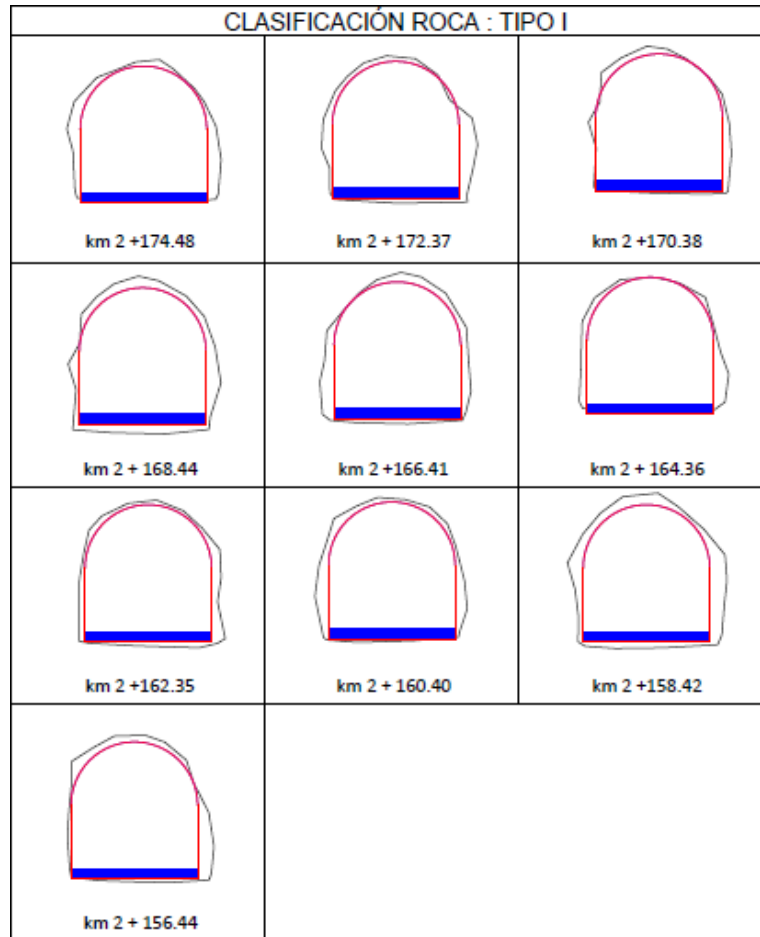


Figura 9. Secciones transversales para una clasificación de roca tipo I en el frente Portal Salida.  
Elaborado por: Ing. Beatriz Sepúlveda

Por medio de la Tabla 8, se resumen los resultados para las secciones mencionadas.

Tabla 8. Resultados obtenidos para la sobreexcavación en roca tipo I en el frente Portal Salida. Elaboración propia

Frente	Abscisa	Clasificación roca	Área teórica (m <sup>2</sup> )	Área real (m <sup>2</sup> )	Sobreexcavación (m <sup>2</sup> )	Distancia secciones (m)	Sobreexcavación (m <sup>3</sup> )	Sobreexcavación promedio (m <sup>3</sup> )
P. Salida	km 2+174.48	I	8.78	9.95	1.17	2.11	2.89	3.05
P. Salida	km 2+172.37	I	8.78	10.36	1.57	1.99	2.49	
P. Salida	km 2+170.38	I	8.78	9.72	0.93	1.94	2.89	
P. Salida	km 2+168.44	I	8.78	10.83	2.04	2.04	3.80	
P. Salida	km 2+166.41	I	8.78	10.48	1.69	2.05	2.55	
P. Salida	km 2+164.36	I	8.78	9.59	0.81	2.01	2.25	
P. Salida	km 2+162.35	I	8.78	10.22	1.44	1.95	2.87	
P. Salida	km 2+160.40	I	8.78	10.29	1.51	1.98	3.88	
P. Salida	km 2+158.42	I	8.78	11.20	2.42	1.97	3.81	
P. Salida	km 2+156.44	I	8.78	10.23	1.45			

Adicionalmente, se extraen tres secciones transversales del frente correspondiente a Portal Entrada, en las cuales la clasificación del macizo, hace referencia a roca tipo II. El número de secciones en este caso obedece a las condiciones in situ, ya que, entre las abscisas seleccionadas, el área de excavación es constante, mientras que las demás secciones que se ubican dentro de la misma clasificación, constan de un sistema de arcos para generar estabilidad. Todo esto, implica en algunos casos modificaciones adicionales en la sección, con el fin de generar una mayor área que permita la instalación de este sistema, por lo que incluir dichas secciones puede conducir a análisis erráticos. La Figura 10 representa las secciones descritas.



Figura 10. Secciones transversales para una clasificación de roca tipo II en el frente Portal Entrada. Elaborado por: Ing. Beatriz Sepúlveda

Finalmente, se presentan mediante la Tabla 9, los resultados obtenidos para las secciones anteriormente mencionadas.

Tabla 9. Resultados obtenidos para la sobreexcavación en roca tipo II en el frente Portal Entrada. Elaboración propia

Frente	Abscisa	Clasificación roca	Área teórica (m <sup>2</sup> )	Área real (m <sup>2</sup> )	Sobreexcavación (m <sup>2</sup> )	Distancia secciones (m)	Sobreexcavación (m <sup>3</sup> )	Sobreexcavación promedio (m <sup>3</sup> )
P. Entrada	km 0+055.76	II	11.57	15.42	3.86			1.53
						1.70	3.16	
P. Entrada	km 0+054.06	II	11.57	11.43	-0.14			
						1.02	-0.11	
P. Entrada	km 0+053.04	II	11.57	11.50	-0.07			

### 6.3.1. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se debe dejar consignado previo al análisis posterior, que el número de secciones para cada tipo de roca no es similar en ninguno de los casos, esto, debido a la dificultad de obtener secciones transversales idóneas, dadas las características que se tienen in situ. Dichas condiciones adyacentes a cada grupo de secciones, limitaron el rango de elección de las mismas, por lo que la información es limitada en cierta medida, sin embargo, la discusión se plantea a partir de las geometrías obtenidas.

Como se puede apreciar en los resultados expuestos, el menor promedio de sobreexcavación, se presentó en una clasificación de roca tipo II, arrojando como dato, un valor de 1.53 m<sup>3</sup> en contraste con los obtenidos para roca tipo I y IV, con 3.05m<sup>3</sup>, y 3.42m<sup>3</sup> respectivamente.

Por otra parte, con los datos consignados previamente, es evidente que el menor volumen de sobreexcavación se presenta en la roca tipo II, lo que puede ser indicador, de una mejor elección en cuanto al factor de carga empleado para las secciones clasificadas dentro de este tipo de roca, si se cotejan con los demás resultados. Sin embargo, para deducir lo anterior, es clave una descripción detallada del macizo rocoso, que considere distintos factores que pueden ser determinantes en los resultados posteriores a las voladuras, tales como, composición mineralógica de la roca, fallas en el macizo, fuentes de agua adyacentes, entre otras. Por tanto, para un análisis más completo, es preciso contar con una descripción que permita examinar las diferentes condiciones que causaron variabilidad en los resultados.

## 6.4. ANEXO

### 6.4.1. DISEÑO DE DIAGRAMA DE VOLADURA

Considerando que uno de los imprevistos presentados en el proceso de excavación, fue el suministro tardío de los mismos entre los días 9 y 26 de noviembre, se planteó la posibilidad de modificar el diagrama de perforación. Lo anterior, con el fin de reducir tanto el consumo del material empleado en la voladura, como el tiempo de barrenación del frente, mediante la disminución del número de perforaciones.

Como anexo al presente trabajo, se presenta el diagrama de barrenación propuesto, el cual fue calculado, por medio de la metodología de diseño práctico de voladuras.

El resumen de los datos empleados, así como resultados obtenidos, se presentan a continuación mediante la Tabla 10, Tabla 11 y

Tabla 12.

Tabla 10. Datos geométricos empleados para el diseño del diagrama de voladura

Geometría	
Ancho del túnel (m)	3.00
Altura del túnel (m)	3.00
Altura de hastiales (m)	1.50
Radio bóveda (m)	1.50
Área sección (m <sup>2</sup> )	8.03
Volumen teórico arrancado (m <sup>3</sup> )	12.10
N° recomendado de barrenos	30.00
Profundidad barrenos (m)	1.50
Díámetro barrenos (mm)	38.00

Tabla 11. Distribución espacial de barrenos obtenida mediante el método práctico de diseño de voladuras

Predimensionamiento	
Barrenos auxiliares	
Burden (m)	0.90
Espaciamiento (m)	1.00
Taco (m)	0.50
N° explosivos/barreno	4.00
Barrenos de piso	
Burden (m)	0.90
Espaciamiento (m)	1.00
Taco (m)	0.20
N° explosivos/barreno	5.00
Barrenos de contorno	
Burden (m)	0.90
Espaciamiento (m)	1.00
Taco (m)	0.90
N° explosivos/barreno	2.00

Tabla 12. Resultados para diseño de diagrama de perforación

Resultados para diseño			
Sección	Nº de barrenos	Cartuchos/barreno	kg
Piso	4	5	4.9
Auxiliares	8	4	7.84
Contorno	7	2	3.43
Cuña sección 1	4	6	5.88
Cuña sección 2	4	6	5.88
Cuña sección 3	4	6	5.88
Cuña sección 4	4 <td 4	3.92	
Factor de carga (kg/m <sup>3</sup> )			3.1

Empleando los resultados obtenidos y siguiendo las recomendaciones sugeridas, tanto por el ingeniero a cargo del diseño, como por el personal responsable de la perforación, se presentó el diagrama que se muestra en la Figura 11.

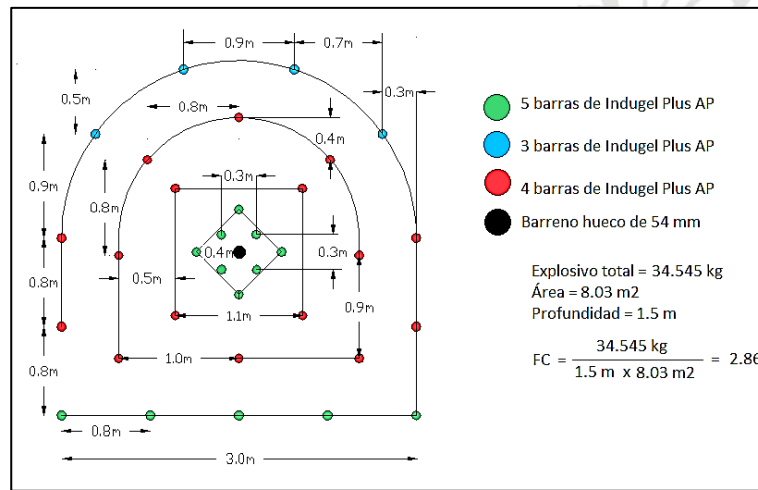


Figura 11. Diagrama de perforación propuesto para el túnel de conducción del proyecto hidroeléctrico TZ 2. Elaboración propia

De esta manera, conjuntamente con el ingeniero encargado de la excavación del túnel, se generó un nuevo diagrama de voladura. Esto, con el fin de examinar los resultados obtenidos y en este sentido perfeccionar o conservar el existente. El diseño fue llevado a cabo, atendiendo al comportamiento del tipo de terreno en el que se hallaba la labor para el día 27 de noviembre. La Figura 12 presenta las modificaciones realizadas

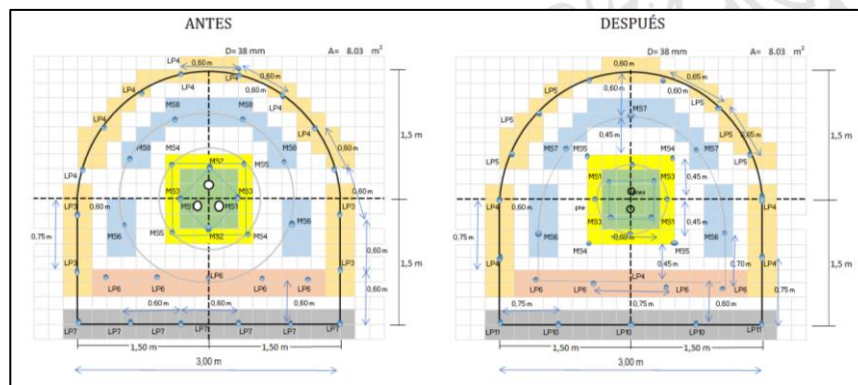


Figura 12. Modificaciones realizadas al diagrama de perforación empleado en el proyecto Hidro TZ 2.

## 7. REGISTRO FOTOGRÁFICO

A continuación, se presentan una serie de fotografías, que evidencian algunas de las actividades correspondientes al ciclo de excavación del túnel de conducción en el proyecto Hidro TZ 2.



Figura 13. Perforación manual del frente de ataque.  
Elaboración propia



Figura 15. Proceso de rezaga mediante el cargador de bajo perfil. Elaboración propia



Figura 14. Proceso de carga y preparación del frente. Elaboración propia



Figura 16. Desabombe de la bóveda y hastiales posterior a la voladura. Elaboración propia



Figura 17. Proyección de agua luego de la voladura.  
Elaboración propia



Figura 19. Indicador de actividades en el ciclo de excavación. Elaboración propia



Figura 18. Tratamientos mediante inyecciones de consolidación. Elaboración propia



Figura 20. Instalación de marcos metálicos como medida de seguridad ante el inicio del proceso de excavación. Elaborado por: Ing. Ricardo Arboleda

## 8. CONCLUSIONES

- Un proceso eficiente de excavación subterránea, depende de una correcta ejecución de las actividades correspondientes al ciclo constructivo. En este sentido, cada una de ellas es importante, por lo que una afectación mínima, genera variaciones y retardos en el comienzo de un nuevo ciclo.
- La importancia de contar con personal experimentado en un proceso de excavación, radica en la identificación temprana de los factores que generan disminución en los rendimientos de las actividades. Por este motivo, como se está llevando a cabo en el proyecto actual, el personal a cargo debe examinar constantemente no solo las condiciones del macizo rocoso o la eficiencia de las voladuras, sino también los equipos y la maquinaria empleada. De esta manera, es posible velar por la eficiencia de las voladuras, así como por el bienestar de quienes ejecutan la labor y la durabilidad de los equipos utilizados a lo largo del tiempo.
- El diagrama de voladura empleado, depende directamente del tipo de roca en el que se encuentre la labor, por lo tanto, si se presentan variaciones a medida que se avanza en profundidad, la malla de perforación se debe examinar cuidadosamente. Esto, con el fin de usar de forma racional el material requerido en las quemas, de modo que las cantidades empleadas, se adapten a las condiciones propias del macizo rocoso.
- A partir de la experiencia vivida en obra, se logró identificar la importancia del sentido de pertenencia en cualquier tipo de proyecto de ingeniería civil sin importar el área. Este aspecto, termina siendo un factor determinante en la de la durabilidad de los equipos y maquinaria empleados. Adicional a esto, existen otro tipo de causas que repercuten en la vida útil de la maquinaria, tales como las horas trabajadas, el mantenimiento periódico, la evaluación constante por parte de los operarios, el empleo en las labores para las cuales fueron diseñados, el tipo de material con el que se esté cargando, el adecuado transporte de estos, las condiciones propias del terreno, entre otros.
- El valor de una comunicación constante entre el ingeniero y el personal a cargo de la ejecución de la labor, radica en la implementación de cambios que permitan la mejora de las condiciones en el frente de ataque. De esta manera, los rendimientos van a verse favorecidos, ya que el personal estará en condiciones que permitan un mejor desempeño durante el tiempo que requiere la actividad. Además, el encargado de la seguridad y la salud de los implicados en la tarea, debe manifestar oportunamente cualquier irregularidad que se presente con respecto al cumplimiento de los requisitos mínimos para un trabajo seguro.
- La construcción de nichos a medida que se avanza en profundidad, se convierte en una labor obligatoria para el proceso de excavación subterránea. Así, el tiempo empleado para despejar el frente de perforación se reduce y es posible reanudar actividades con una mayor velocidad. Posteriormente, la maquinaria a cargo de la actividad de limpieza, transporta el material producto de la voladura desde el nicho hasta el botadero, sin generar interrupciones cercanas al proceso de perforación.



- El hecho de llevar un seguimiento riguroso de los rendimientos del túnel y un cotejo constante con el cronograma establecido, otorga un mayor margen de maniobrabilidad en caso de que los rendimientos no sean los esperados. Dichas aproximaciones, deben considerarse de forma permanente, así como las posibles afectaciones basadas en los avances históricos del proyecto, con el propósito de examinar el progreso de este.
- Un buen diseño de un diagrama de perforación, no depende únicamente del tipo de roca en el cual se esté llevando a cabo la labor. Este, se encuentra sujeto además a la mayor dimensión del frente y al equipo disponible para la rezaga, ya que la ubicación de los barrenos tiene influencia directa sobre el tamaño del material que produce la voladura. Por consiguiente, una correcta disposición geométrica de los mismos, permite que la actividad de rezaga transcurra adecuadamente, de modo que se prolongue la durabilidad de la maquinaria y se reduzca el tiempo dedicado a la limpieza del túnel.

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “¿Qué hacemos? - Excavaciones Subterráneas y Tratamientos.” <http://excavacionessubterraneeas.co/que-hacemos/> (accessed Oct. 18, 2020).
- [2] SCT, “Métodos de excavación,” in *MANUAL DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES DE CARRETERA*, 2016.
- [3] C. López Jimeno, “INTRODUCCIÓN,” in *MANUAL DE TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS*, Madrid, 1997, p. 314.
- [4] Ministerio del Trabajo, “Guía de Trabajo Seguro en Excavaciones,” 2014. Accessed: Sep. 20, 2020. [Online]. Available: <https://www.mintrabajo.gov.co/documents/20147/51963/Guía+de+Escavaciones+09+FEB.pdf/1892a703-82bc-3652-cdd7-5380e6e2079c>.
- [5] IGME, “Mecanismos responsables de la sobreexcavación,” in *MANUAL DE PERFORACIÓN Y VOLADURA DE ROCAS*, p. 292.
- [6] EXSA, “Voladura secundaria,” in *MANUAL PRACTICO DE VOLADURA*, p. 208.
- [7] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, “Glosario,” in *MANUAL PARA EL DISEÑO , CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE TÚNELES DE CARRETERA*, 2015th ed., J. C. García Leal and J. M. Dávila Méndez, Eds. 2015.
- [8] EXSA, “ESTRUCTURA DE LAS ROCAS,” in *MANUAL PRACTICO DE VOLADURA*, p. 65.
- [9] C. López Jimeno, “Avance por pega,” in *MANUAL DE TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS*, Madrid, 1997, p. 344.
- [10] C. A. Bernal Torres, “Cronograma de actividades,” in *Metodología de la investigación*, 3rd ed., 2010, p. 223.
- [11] P. Orihuela and D. Estebes, “APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LA LÍNEA DE BALANCE A LA PLANIFICACIÓN MAESTRA,” 2013, Accessed: Oct. 18, 2020. [Online]. Available: [https://www.academia.edu/9602950/APLICACIÓN\\_DEL\\_MÉTODO\\_DE\\_LA\\_LÍNEA\\_DE\\_BALANCE\\_A\\_LA\\_PLANIFICACIÓN\\_MAESTRA](https://www.academia.edu/9602950/APLICACIÓN_DEL_MÉTODO_DE_LA_LÍNEA_DE_BALANCE_A_LA_PLANIFICACIÓN_MAESTRA).