

**REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINERÍA.
DEPARTAMENTO DE MINERÍA**



**PROCEDIMIENTO PARA ELEGIR LA TÉCNICA DE CONTROL DE LAS
FILTRACIONES QUE AFECTAN LAS EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS EN
MACIZOS ROCOSOS POCO POROSOS Y AGRIETADOS.**

**Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias
Técnicas.**

Autor: MSc. Armando Francisco Cuesta Recio.

MOA- 2010

**REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINERÍA.
DEPARTAMENTO DE MINERÍA**



**PROCEDIMIENTO PARA ELEGIR LA TÉCNICA DE CONTROL DE LAS
FILTRACIONES QUE AFECTAN LAS EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS EN
MACIZOS ROCOSOS POCO POROSOS Y AGRIETADOS.**

**Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias
Técnicas.**

Autor: MSc. Armando Francisco Cuesta Recio.

Tutor: DrC Roberto Lincoln Watson Quesada.

MOA- 2010

La Ciencia está formada por hechos,
como la casa está construida de piedras,
pero una colección de hechos no es una Ciencia,
así como un montón de piedras no es una casa.

Jules Henri Poincaré (1854 1912)

“ La Science et la Hypothèse” (1903)

Unfortunately, soils are made by nature and not by man,
and the products of nature are always complex.

Karl Von Terzaghi, 1936

Agradecimientos

- Le agradezco al Instituto Superior Minero Metalúrgico la paciencia y confianza depositada en el autor.
- Al tutor Dr Roberto Lincoln Watson Quesada por la ayuda y apoyo brindado para la realización del trabajo.
- A mi Tío Delfín Guillén Arteaga por sus consejos y experiencias transmitidas.
- Al Dr. José Otaño Noguel a quien agradezco infinitamente las enseñanzas transmitidas.
- A la estimada señora María Cristina por su invaluable ayuda, y enseñanzas.
- Al departamento de Minería por la actitud consecuente mantenida en estos años y por su colaboración en las diferentes etapas del trabajo.
- A la dirección de la Facultad Geología y Minas del ISMM.
- A la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Holguín.
- A la DIP del Tránsito Este Oeste ubicada en Mayarí
- A Unión de Construcciones Militares de Holguín que ejecuta los túneles de la primera etapa del Tránsito Este Oeste.
- A Roilber Lambert y Arístides Legrá por sus colaboraciones.
- A mi compañera Miriam Rodríguez Bárcenas por soportar juntos las presiones del trabajo, por el aliento que siempre me ha dado y por convertirse en una especial animadora de estos últimos momentos.
- A todos lo que de una forma u otra han puesto un grano en este trabajo.

Dedicatoria

A mi pequeña familia, esposa e hijo.

Síntesis

El presente trabajo tiene como objetivo general establecer un procedimiento para elegir la técnica de control de las filtraciones que afectan las excavaciones subterráneas desarrolladas en macizos rocosos fuertes poco porosos y agrietados, tomando en consideración la correlación existente entre la calidad de los macizos fuertes y su permeabilidad, así como los principales factores que inciden en los procesos de control y circulación del agua a través del conjunto macizo rocoso-excavación.

La tesis se estructuró en 4 capítulos; en el primero se desarrolla el marco teórico conceptual y se evalúa la actualidad y viabilidad de la investigación. En el segundo capítulo se argumentan los principales factores que inciden en los procesos de infiltración, filtración y control del agua que afecta una excavación subterránea, para lo cual, además de pruebas experimentales y la bibliografía consultada relacionada con la temática, se realizó una consulta de expertos empleando el método Delphi. En el capítulo tres se estructuró el procedimiento y se creó como herramienta de elección, el algoritmo a partir del cual se elaboró un software. En el capítulo cuatro se describe la aplicación del procedimiento en el Túnel Serones-Salida Guaro, obteniendo que las técnicas o variantes obtenidas están en plena concordancia con la situación real existente en la obra.

Se identifican las características orográficas, hidrográficas, lito-estructurales, tectónicas e hidrogeológicas como los principales factores condicionantes de la susceptibilidad de las excavaciones subterráneas a fenómenos negativos relacionados con la presencia de agua. Esta **susceptibilidad** se obtuvo a partir de:

- evaluar la influencia de los factores antes mencionados en los procesos de filtración y deterioro del conjunto macizo excavación.
- la evaluación experimental del deterioro de las propiedades de resistencia por la acción del agua.
- la búsqueda de conocimientos teórico-prácticos aplicando el método Delphi,

El procedimiento desarrollado, mediante la utilización de mapas temáticos de factores, permite:

- delimitar las zonas susceptibles así como el grado de la susceptibilidad en cada caso.
- seleccionar las técnicas más adecuadas mediante la aplicación del algoritmo o software creado con ese propósito.
- elegir la variante racional para controlar el agua que afecta una excavación subterránea.

INDICE

Contenido	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DEL PROBLEMA.....	8
I.1- ANTECEDENTES HISTÓRICOS EN EL TRATAMIENTO A LAS FILTRACIONES DEL AGUA QUE AFECTAN LAS EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS.	9
I.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS FILTRACIONES DE AGUA EN EL MACIZO ROCOSO.....	16
I.3 TÉCNICAS PARA CONTROLAR LAS FILTRACIONES DE AGUA A LAS EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS.	29
CONCLUSIONES.	36
CAPÍTULO II: FACTORES QUE INCIDEN EN LOS PROCESOS DE CIRCULACIÓN DEL AGUA, SU CONTROL Y CRITERIOS PARA LA ELECCIÓN DE LA TÉCNICA CON ESE PROPÓSITO.....	38
II.1- FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE SELECCIÓN, SOMETIDOS AL CRITERIO DE LOS EXPERTOS.....	38
II.2- MÉTODO DELPHI.	39
II.3- CRITERIOS PARA ELEGIR LA VARIANTE QUE MÁS SE ADECUA	44
CONCLUSIONES:.....	46
CAPÍTULO III: PROCEDIMIENTO PARA ELEGIR LA TÉCNICA ADECUADA PARA EL CONTROL DE LAS FILTRACIONES DE AGUA QUE AFECTAN EL TÚNEL.....	48
III.1- ESTRUCTURA DEL PROCEDIMIENTO.....	48
III.2- DELIMITACIÓN DE ZONAS SUSCEPTIBLES A DETERMINADOS FENÓMENOS RELACIONADOS CON LA PRESENCIA DE AGUA EN LA TRAZA DE LA EXCAVACIÓN.....	48
III.3- CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS SUSCEPTIBLES A LAS PRESENCIA DE AGUA EN EL ÁREA DE INFLUENCIA DE LA EXCAVACIÓN SUBTERRÁNEA.....	54
III.4-SELECCIÓN DE LA TÉCNICA PARA EL CONTROL DE LAS FILTRACIONES DE AGUA A LAS EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS.....	60
III.5- ELECCIÓN DE LA TÉCNICA MÁS ADECUADA PARA CADA CASO CONCRETO.....	65
CONCLUSIONES.....	68
CAPÍTULO IV: APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PROPUESTO.	70
IV.1- ELECCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LAS OBRAS A ESTUDIAR.....	71
IV.2.1- Delimitación en la traza de la excavación de zonas de susceptibles a la presencia de agua.....	74
IV.2.2- Caracterización de las zonas susceptibles por las filtraciones de agua.....	80
IV.2.3- Selección de las posibles técnicas para el tratamiento de las filtraciones.....	88
IV.2.4- Elección de las variantes por zonas o tramos de túnel considerando los criterios de elección....	89
IV.3 - RESULTADOS:	91
IV.4- IMPACTOS PRODUCIDOS POR LA PRESENCIA DE AGUA EN TÚNEL DEL TRASVASE ÉSTE OESTE.....	92
CONCLUSIONES.....	94
CONCLUSIONES:.....	96
RECOMENDACIONES:.....	98
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	100
ANEXOS.....	110

INTRODUCCIÓN.

En las excavaciones subterráneas se presentan varios fenómenos que inciden negativamente en los procesos constructivos. Entre ellos sobresalen los flujos de agua subterránea que circulan por los macizos rocosos y afectan la calidad de éste y de las excavaciones subterráneas causando pérdidas materiales y económicas, además de afectar la salud de quienes laboran en este medio. Esta situación ocurre generalmente cuando los proyectistas no toman en consideración las afectaciones que puede provocar, a corto y largo plazo, el agua al combinarse con determinados fenómenos geológico estructurales, obviando de esa manera lo planteado por Terzaghi (López-Jimeno. et al., 2004): "la geología más que ningún otro factor, determina el grado de dificultad y costo de una excavación subterránea".

Se conoce la publicación a nivel internacional de muchos trabajos relacionados con temáticas como; evaluación de aspectos que inciden en la circulación del agua y su control, modelación numérica de estos aspectos; de igual manera se han abordado las técnicas para el control del agua y los aspectos que inciden en su uso efectivo entre otras; las que constituyen la base para la elaboración y establecimiento de un procedimiento de elección de técnicas para controlar el agua que afecta una excavación subterránea laboreada en un macizo rocoso fuerte poco poroso y agrietado.

Sobre resultados de investigaciones acerca de procedimientos de elección de técnicas para controlar el agua que afecta una excavación subterránea laboreada en un macizo rocoso fuerte poco poroso y agrietado, se conoce que J.S Harris y Pollard en su trabajo publicado en 1986 se limitan a tratar aspectos a considerar para el control del agua que afecta estas obras cuando se utiliza alguna de las siguientes técnicas: bombeo, inyección, congelación o electroósmosis; proponen además un algoritmo para la selección de una de las técnicas por ellos analizadas (Harris & Pollard, 1986).

Las limitaciones para aplicar en nuestro país el procedimiento propuesto por Harris y Pollard en 1986, están dadas por el reducido número de técnicas consideradas para controlar el agua en las excavaciones subterráneas (cuatro), de las cuales, la tecnología de congelación resulta económicamente irracional aplicar en Cuba por su clima tropical; por otro lado, no se consideran variables como: tipo, destino y plazo de servicio de la excavación subterránea, régimen de lluvia, etc. que influyen en la selección de la técnica para el tratamiento.

En Cuba según la bibliografía consultada no se reporta la existencia o aplicación de un procedimiento de elección de la técnica adecuada para el control del agua que afecta este tipo de obra anterior al 2005, posterior a esta fecha el autor de esta tesis ha realizado algunas publicaciones de la temática (Cuesta et al., 2007; Cuesta et al., 2008; A Cuesta et al., 2009; Armando Cuesta et al., 2009).

Situación Problémica.

Actualmente “crecer hacia abajo” es una de las tendencias mundiales en la construcción de viviendas, almacenes e industrias. En Cuba, la construcción de excavaciones subterráneas es, desde hace muchos años, una necesidad estratégica debido a la seguridad y ventajas que ofrece el interior de los macizos rocosos con respecto a las grandes y altas construcciones en la superficie; por ello actualmente se continúa la construcción de excavaciones subterráneas con variados fines tales como: minas y sus galerías mineras, refugios, depósitos, almacenes, pequeñas ciudades, etc. Debido a la génesis volcánica de la isla de Cuba y el predominio de los macizos geológicamente jóvenes, la construcción en macizos rocosos poco porosos y fuertes es uno de los aspectos que distingue a más del 40 % de las construcciones subterráneas.

Algunas afectaciones que se producen en las excavaciones subterráneas como derrumbes, pérdida de estabilidad, inundación parcial o total, aumento de la humedad relativa, entre otras, guardan estrecha relación con los períodos de lluvia, el estado de saturación del terreno y el escurrimiento superficial y subterráneo, aspectos que no siempre se toman en consideración para el diseño correcto de este tipo de obras, lo que puede traer como consecuencia que se afecte negativamente el cumplimiento del cronograma de ejecución del proyecto y el presupuesto asignado. Ello hace necesario en ocasiones, rediseñar parcial o totalmente la construcción o algunos de sus elementos; existiendo casos en que resultó económicamente racional abandonar el proyecto. Todas estas situaciones tienen un impacto económico, ambiental y social tangible.

El conocimiento con que se cuenta actualmente sobre el origen y comportamiento del agua subterránea, permite identificar los principales factores que favorecen el surgimiento de afectaciones en el conjunto macizo-excavación relacionadas con el agua.

Para la elección de las técnicas de control de las filtraciones que afectan el conjunto macizo excavación no siempre se tiene en cuenta el estudio previo de las características del macizo rocoso poco poroso y agrietado, ni se sigue un procedimiento basado en el análisis de variantes. La integración lógica y dialéctica de estas insuficiencias en la determinación de las técnicas para el control de las filtraciones, contribuirá a seleccionar la idónea en cada caso, siempre que se laboree

en este tipo de macizo, donde debido a la abertura y forma de las caras de las grietas es predominante el régimen laminar de los flujos de agua subterránea.

Problema Científico:

Necesidad de establecer un procedimiento que permita elegir la técnica más adecuada para controlar las filtraciones de agua que afectan las excavaciones subterráneas de pequeña y mediana sección laboreadas en macizos rocosos fuertes poco porosos y agrietados.

Objeto de la Investigación

Las excavaciones subterráneas de pequeña y mediana sección laboreadas en macizos rocosos fuertes poco porosos y agrietados.

Campo de Acción

Control del agua que afecta las excavaciones subterráneas de pequeña y mediana sección laboreadas en macizos rocosos fuertes poco porosos y agrietados.

Objetivo:

Establecer un procedimiento que permita elegir la técnica más adecuada para controlar el agua que afecta las excavaciones subterráneas de pequeña y mediana sección laboreadas en macizos rocosos fuertes poco porosos y agrietados.

Hipótesis:

Un proceso basado en la caracterización y manejo de parámetros relacionados con características geométricas de la superficie del terreno; con la hidrografía e hidrogeología; con propiedades máxicas y de resistencia de materiales, así como con la tectónica de los macizos rocosos fuertes poco porosos y agrietados, permite elegir de forma efectiva y racional la técnica para controlar las filtraciones de agua que afectan las excavaciones subterráneas de pequeña y mediana sección laboreadas en estos macizos.

Objetivos específicos.

- I. Caracterizar los factores que influyen en los procesos de infiltración y filtración de agua por los macizos rocosos fuertes poco porosos y agrietados, y hacia el interior de las excavaciones subterráneas.
- II. Caracterizar los factores que influyen en el proceso de control del agua que afecta las excavaciones subterráneas.
- III. Caracterizar las principales técnicas utilizadas para controlar el agua que afecta una excavación subterránea.
- IV. Determinar los factores condicionantes de los procesos de:

- a. filtración e infiltración del agua en los macizos rocosos fuertes poco porosos y agrietados.
 - b. selección de la técnica adecuada para controlar las filtraciones de agua que afectan la excavación subterránea.
- V. Establecer un sistema de criterios que permita elegir la técnica más adecuada para controlar las filtraciones de agua que afectan una excavación subterránea, a partir de la integración de los principales factores que condicionan los procesos de filtración e infiltración del agua en el macizo y las exigencias tecnológicas de la excavación subterránea.
- VI. Establecer la secuencia para aplicar el procedimiento a un caso de estudio.

Tareas de la Investigación.

Se establecieron tareas concretas para dar cumplimiento a cada objetivo específico, que constituyeron etapas del trabajo.

- Etapa 1
1. Se desarrolla el marco teórico de la investigación y se define la metodología de la investigación a seguir.
 2. Se evalúa el tratamiento teórico y práctico dado al control del agua en las excavaciones subterráneas
 3. Se caracterizan los factores que favorecen que el agua circule en los macizos rocosos fuertes poco porosos y agrietados y hacia las excavaciones subterráneas de pequeña y mediana sección.
 4. Se caracterizan y evalúan las principales técnicas utilizadas para el control del agua que afecta las excavaciones subterráneas de pequeña y mediana sección.
- Etapa 2
5. Se identifican los principales factores condicionantes que inciden en los procesos de filtración, infiltración y selección de la técnica para controlar el agua.
 6. Se establece un sistema de criterios para elegir la técnica para controlar el agua que afecta una excavación subterránea de pequeña y mediana sección laboreada en un macizo rocoso fuerte poco poroso y agrietado.

- Etapa 3 {
7. Se elabora la herramienta de selección de las posibles técnicas para controlar el agua que afecta la excavación subterránea.
 8. Se estructura y desarrolla el procedimiento para elegir la técnica para controlar el agua que afecta una excavación subterránea de pequeña y mediana sección laboreada en un macizo rocoso fuerte poco poroso y agrietado.
- Etapa 4 {
9. Se caracteriza la zona objeto de estudio tomando en consideración los principales factores condicionantes.
 10. Se evalúa la aplicabilidad del procedimiento a partir de los resultados de su implementación en un caso de estudio.

Novedad Científica.

Un procedimiento de amplia aplicabilidad que permite elegir la técnica para controlar las filtraciones de agua que afectan una excavación subterránea de pequeña y mediana sección, laboreada en un macizo rocoso poco poroso y agrietado, considerando parámetros que condicionan los procesos de filtración e infiltración del agua en el macizo rocoso, tales como pendiente; compactación; composición mineralógica, fallas y estratos, agrietamiento, porosidad, resistencia a compresión y tracción, densidad, masa volumétrica, lámina de infiltración, coeficiente de infiltración y filtración; profundidad de ubicación, forma y dimensiones, así como destino, vida útil, sostenimiento y fortificación de la excavación. Se considera igualmente el régimen de lluvia; presencia de ríos, arroyos y embalses en la zona.

Aportes Prácticos

- I. Variante del método Heurístico para delimitar las zonas susceptibles a la ocurrencia de fenómenos relacionados con la presencia de agua en excavaciones subterráneas, aspecto que incluido en la etapa de proyecto permite tratar de forma diferenciada estas zonas con un probable ahorro total.
- II. Como herramienta de trabajo ingenieril, se elaboró un software que implementa el algoritmo de elección para seleccionar la técnica de control de las filtraciones que afectan una excavación subterránea.

Alcance de la investigación:

Se establece un procedimiento tecnológico para elegir la técnica adecuada para controlar el agua que afecta las excavaciones subterráneas de pequeña y mediana sección laboreadas en macizos rocosos fuertes poco porosos y agrietados.

Resumen de las principales publicaciones

- Mecanismo de acción de la presión minera en mina Merceditas (Memorias del Congreso Cubano de Geología Minería; 1998);
- Análisis de las metodologías para la evaluación de la estabilidad en macizos rocosos (Memorias del evento " (CINAREM"; 1998.);
- Análisis de las metodologías para la evaluación de la estabilidad de los macizos rocosos (Revista Geología, Minería. 1998);
- Evaluación de la presión minera en la mina Merceditas (Revista Geología, Minería, 1998),
- Metodología integral de selección del sistema de control del agua para evitar las posibles afectaciones en las obras subterráneas, I Convención Internacional de las Geociencias y la Química Aplicada a la Construcción (2005 Santiago de Cuba ISBN 959-247-021-9);
- Procedimiento para seleccionar el sistema idóneo para controlar el agua que puede afectar el proceso de construcción de una obra subterránea (II Convención de Ciencias de la Tierra, Habana 2007, ISBN 978-959-7117-16-2);
- Procedimiento para el control de filtraciones en excavaciones subterráneas. Caso de estudio Túnel Serones – Salida Guaro, Revista Geología, Minería. ISSN 1993 8012, V. 24, n; 3 2008;
- Automatización del proceso de elección de la técnica adecuada para controlar el agua que afecta una excavación subterránea, III Convención de Ciencias de la Tierra, Habana 2009, ISBN 978-959-7117-19-3);.
- Delimitación de zonas susceptibles a filtraciones en el túnel Serones-Salida Guaro del Tránsito Este-Oeste. Revista Geología, Minería. ISSN 1993 8012, V. 25, n; 3 2009

CAPÍTULO I

CAPÍTULO I: ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DEL PROBLEMA.

Las filtraciones descontroladas de agua al interior de las excavaciones subterráneas inciden directa o indirectamente en varias de las afectaciones que se producen en este tipo de obra. Entre éstas se pueden mencionar: pérdida de estabilidad del conjunto macizo excavación, disminución de las propiedades de resistencia del macizo, inundaciones, variación de los parámetros de la atmósfera subterránea, etc. Por sus consecuencias y efectos negativos así como su incidencia en el costo de ejecución de la obra es necesario aplicar técnicas para controlar el proceso de infiltración de agua a las excavaciones. Esta situación técnica y económica se hace más compleja cuando no se consideran adecuadamente la magnitud de la presencia de agua y las técnicas para su control en el diseño inicial. Varios investigadores consideran que el aumento de los costos de construcción y explotación de los túneles y otras obras subterráneas guarda relación con la correcta o incorrecta utilización de técnicas para el control del agua (Yuan et al., 2000; Zhang & Shen, 2004; Crouthamel et al., 2005; Ganz, 2005; González, 2005; Rivas, 2006).

Las técnicas para el control de las filtraciones son usadas por el hombre desde varios siglos A.N.E; su desarrollo histórico va desde las rústicas zanjas para el desagüe, hasta las geomembranas y geotextiles. Es común denominar **impermeabilización** al proceso mediante el cual se controlan los flujos de agua que se infiltran y afectan una excavación subterránea. En la actualidad se asume que el control de las filtraciones no es solo impermeabilizar, sino que consiste también en encauzar el agua (dirigir el flujo según convenga), o lograr la estanqueidad total de la obra afectada. Por ello se considera que se ajusta más utilizar el término de **control del agua** o **control de las filtraciones de agua** en lugar de impermeabilización, cuando se refiere al control del agua que afecta una excavación subterránea.

El estudio del comportamiento de aspectos que inciden en el proceso de filtración y control del agua es una tendencia actual, para ello se han desarrollado modelos; confeccionado

software y otras sofisticadas herramientas que han facilitado pasos sólidos en la hidrogeología y ciencias afines. Sin embargo, en la temática relacionada con la elección de un sistema o técnica adecuada para el control de las filtraciones de agua que afectan una excavación subterránea, no se ha logrado un avance significativo, a pesar del incremento de este tipo de obras en condiciones hidrogeológicas complejas (túnel bajo el estrecho de Gibraltar, túnel de Bracons).

El Doctor Rafael Martínez Silva en su obra " Construcciones Subterráneas ", analiza las difíciles condiciones hidrogeológicas y geotécnicas de los túneles populares, Silva hace énfasis en la necesidad de profundizar en los estudios geológicos previos al diseño y construcción de este tipo de obra (Martínez-Silva, 2001). Tomando en consideración lo planteado por el Dr. Martínez Silva, se considera que dentro de los aspectos en que se debe profundizar, se encuentra el tratamiento al agua cuando dificulta la construcción y explotación de estas obras, además del daño que puede causar a la salud humana, aspecto que no fue abordado en la mencionada obra.

I.1- Antecedentes históricos en el tratamiento a las filtraciones del agua que afectan las excavaciones subterráneas.

Según evidencias históricas reflejadas en la literatura especializada, se plantea que aproximadamente en el 2200 a.n.e bajo el río Éufrates se construyó el primer túnel de gran envergadura, donde el agua fue el principal obstáculo constructivo. El historiador Diodoro de Sicilia describió las etapas de construcción y explotación de la mencionada obra bajo el río, y la catalogó como una estratégica y magnífica construcción,(López-Jimeno et al., 1997) , esta obra fue construida por el método de los falsos túneles, y se utilizó como técnica para el control del agua durante la construcción, el desvío de las aguas superficiales. Es evidente que durante la construcción gran número de pérdida de vidas humanas se debió a las inundaciones producidas por el Río Éufrates, del que no se conocían las máximas avenidas, aunque ya se dominaba la época en que éstas se producían, según describe el historiador, lo cual confirma que desde entonces los constructores consideraban necesario el estudio de las escorrentías superficiales, aún cuando no conocieran con exactitud su magnitud.

En 1800 Ralph Dodd inició los trabajos para construir un túnel bajo el río Támesis, para lo que utilizaría un pozo hincado de tres metros y desde el fondo de éste perforaría el túnel. Tras dos años de trabajo, el proyecto fue abandonado debido a inundaciones que se producían y el alto costo del bombeo. El autor de esta tesis considera que el fracaso se produjo principalmente por no evaluar adecuadamente el elevado coeficiente de permeabilidad que tiene el lecho rocoso bajo el Támesis, de lo que se desprende la importancia de conocer el coeficiente de permeabilidad del terreno donde se construirá una excavación subterránea, lo que toma mayor relevancia cuando se construye próximo a grandes masas de agua.

Las condiciones geotécnicas en el Estrecho de Gibraltar han incidido en el atraso de la construcción del túnel del mismo nombre; algunos de los aspectos geotécnicos estaban relacionados con la presencia de agua (presión hidrostática elevada, peligro de hinchamiento de la roca, etc) (Salas & González, 1984). El tratamiento de estas afectaciones provocó gastos adicionales superiores a los considerados en el proyecto inicial por España y Marruecos, razón por la cual se paralizó. En el trabajo los autores no analizan entre las causas, la aparición de situaciones minero-técnicas no evaluadas en los estudios previos, la profundidad con que se realizaron las investigaciones ingeniero-geológicas, específicamente las relacionadas con la hidrogeología, provocando un aumento de los costos del proyecto para la primera etapa. De este trabajo se derivan dos aspectos fundamentales, el primero es la necesidad de evaluar con la profundidad requerida las condiciones hidrogeológicas y en segundo lugar, lo costosa que resulta la presencia de agua descontrolada durante la construcción de una excavación subterránea si no es considerada previamente.

En el trabajo "Control del Agua Subterránea por Galería de Drenaje en Aberfan, South Wales" (Siddle, 1986) se describe la construcción de una galería de desagüe cercana a una zona minera con el propósito de disminuir la presión del agua que afectaba el factor de seguridad de los taludes; se muestra además algunas de las afectaciones producidas por el agua cuando aumenta la presión de poros y disminuye el esfuerzo normal que soporta el macizo rocoso en estado saturado. Esta situación se presenta en obras subterráneas construidas por encima del nivel del acuífero cuando en la época de lluvia se satura el macizo y aparecen presiones de agua que favorecen la pérdida de estabilidad. Sin embargo, el autor se limita a los problemas

técnicos que se resuelven con la aplicación de esta técnica, pero no tomó en consideración el daño que produce al medio ambiente el hacer descender de forma forzada el nivel acuífero. El autor de esta tesis considera que las técnicas de drenaje deben ser utilizadas mayormente de forma temporal y utilizar métodos de recarga artificial del acuífero para evitar daños como los ocurridos en la comunidad de Serones en Mayarí, donde el descenso del nivel del manto a causa de la construcción de un túnel, provocó que el pozo que abastecía a los habitantes de la comunidad quedara inhabilitado. De este caso se desprende la necesidad de establecer un grupo de criterios para elegir una variante efectiva para controlar el agua que afecta una excavación subterránea (túneles, galerías de minas, etc) y que a la vez provoque el menor impacto negativo socio-ambiental.

(Kovári & Anagnostou, 1996) presentaron en la Segunda Conferencia Internacional “Geosistemas y Acondicionamiento Subterráneo” celebrado en Japón, un trabajo relacionado con el diseño de las inyecciones cilíndricas alrededor de una excavación que se ubicaba a 1800 metros de profundidad en un macizo rocoso saturado, donde predominan las rocas sedimentarias (dolomitas y esquistos arcillosos) e ígneas. Los grandes volúmenes de agua dificultaban el trabajo y resultaba inseguro laborear en la zona de contacto de las dolomitas y las rocas ígneas. Luego de realizado el estudio se decidió tratar el problema mediante la aplicación de dos técnicas; en la zona de las dolomitas areno-arcillosas se realizaron drenajes para consolidar el área y hacerla más estable, mientras que donde yacían las rocas ígneas el problema se trató a través de inyecciones de cemento (lechadas). Es importante señalar que las presiones de inyección se seleccionaron a partir del límite de plasticidad de las rocas, pero no consideraron que la presión del agua en los poros disminuye las propiedades de resistencia de la roca, por lo que el límite de plasticidad estará afectado por la presión hidrostática (μ), lo que toma relevancia si analizamos que la excavación se ubica a 1800 metros y el nivel del manto freático se encuentra a 1500 metros, existiendo una columna de agua de 300 metros por encima de la excavación, aunque los resultados fueron satisfactorios, existe la posibilidad de haber realizado las inyecciones a exceso de presión caracterizado por $\mu = \gamma_{\text{agua}} \times H$, lo que pudo provocar un agrietamiento adicional.

De lo anterior se deriva la importancia que tiene la presión hidrostática cuando se utiliza el hormigón lanzado e inyección de sustancias cementantes como técnicas para controlar el agua.

En el año 2000 L Yuan y otros investigadores en el trabajo "La Impermeabilización de Túnel, una Práctica en China"(Yuan et al., 2000), reconocen que la infiltración de agua al interior de los túneles en vías de transporte en China, no sólo reduce la durabilidad del revestimiento y el funcionamiento estable de la obra, sino que también afecta la capa de rodamiento del túnel incidiendo directamente en los costos de mantenimiento, y plantean la necesidad de un tratamiento preventivo de las filtraciones en este tipo de obras. Los autores plantean que no siempre se pueden aplicar las técnicas tradicionales para el control del agua, sino que se debe realizar un estudio previo para controlar eficientemente las infiltraciones y fugas de agua, y no cuentan con un procedimiento que permita estandarizar el uso y diseño de los diferentes métodos para el control del agua. En el trabajo describen las condiciones de aplicación de las técnicas, además proponen métodos para determinar algunos parámetros que inciden en los procesos de infiltración y control del agua. Aunque los investigadores aplican sus herramientas para demostrar la necesidad del empleo de técnicas para el control de las filtraciones que afectarían los túneles, no integran estos resultados con las condiciones de aplicación de cada una de las técnicas tratadas lo que hubiera podido constituir un procedimiento para la elección de la técnica para determinadas condiciones.

Paul G. Marinos para el estudio y solución de problemas minero-técnicos que se presentan durante la construcción de minas y túneles en rocas calcáreas en contacto con el agua, establece 6 casos y 6 modelos; los modelos A y B propuestos para rocas calizas en los que el agua circula principalmente por grietas y los modelos del C al F aplicables a rocas cársticas para los que se proponen soluciones para el tratamiento del agua que afecta una mina o túnel subterráneo, sin embargo, aunque el autor toma casos de estudio históricos donde la aplicación de los métodos de drenaje provocaron serios problemas medioambientales (Marinos, 2001), no recomienda conjuntamente con la propuesta de dichas técnicas la utilización del sistema de recarga artificial del manto acuífero para disminuir estas afectaciones. El autor de esta tesis considera que el uso de las técnicas que impliquen el

descenso del manto acuífero deben ser utilizadas de forma temporal y acompañadas de un sistema de recarga artificial.

La pérdida de estabilidad en varios túneles submarinos en Noruega fue investigada por (Nilsen & Palmström, 2001); quienes detectaron que las afectaciones más severas se producían en zonas donde convergían áreas debilitadas estructuralmente y que a la vez poseían un alto coeficiente de filtración, trayendo como resultado el colapso del sostenimiento, seleccionado previamente por el Método Noruego de Construcción de Túneles que basa su esencia en el índice Q propuesto por Barton (Barton et al., 1974). Estos autores consideraron que las afectaciones ocurridas en los túneles se debieron a un estudio insuficiente de las características geoestructurales e hidrogeológicas de la traza del túnel. El autor de esta tesis considera que otros hubieran sido los resultados de haberse tenido en cuenta los siguientes aspectos:

- a. La variación de las propiedades y características de las rocas ante la presencia del agua.
- b. Cuando la selección del sostenimiento y/o revestimiento se realiza mediante las clasificaciones geomecánicas clásicas (Barton, Bieniawski o el nuevo método austriaco de construcción de túneles) y el macizo rocoso se clasifica de permeable a muy permeable, no basta sólo con seleccionar el sostenimiento, sino que se debe prestar especial atención a las técnicas para controlar el agua y evitar las afectaciones que ésta produce a corto y largo plazo.
- c. No se contaba con un procedimiento que facilitara la elección de la técnica para controlar el agua.

En el año 2004 In Mo Lee y Seok Woo Nam hacen un análisis retrospectivo de la actuación de la presión del agua sobre el revestimiento y sostenimiento de los túneles durante su laboreo y explotación. Los investigadores utilizaron como parámetros fundamentales la permeabilidad (k), el avance del túnel (v) y el coeficiente de retención específica de agua, además de analizar el comportamiento de la presión hidrostática sobre un túnel a diferentes profundidades (H) y diámetros de la obra (D). Como resultado obtuvieron que a medida que aumenta la

profundidad, aumenta la presión del agua sobre el revestimiento a partir de la evaluación de la siguiente relación $\left(\frac{D \cdot S \cdot v}{k}\right)$ utilizando el soft Gacet. Establecen además, una diferencia importante en la acción de la presión hidrostática sobre el revestimiento, dependiendo de la impermeabilización total o no del túnel. En este sentido comprobaron que a una profundidad menor de 50 metros, la utilización de sistemas de drenaje produce una caída de tensión sobre el revestimiento y rocas del contorno, mientras que cuando se realiza una impermeabilización "total", este esfuerzo es mayor (I. M. Lee & Nam, 2004)

Del estudio realizado por In Mo Lee y Seok Woo Nam se deduce que cuando se construye en macizos considerados muy permeables y agrietados, la utilización de sistemas de descarga del manto acuífero adelantado a la excavación (drenaje), al disminuir la presión hidrostática (μ) contribuye a mejorar la estabilidad de la obra y se reduce la posibilidad de colapso de las paredes y techos en túneles.

Las minas de carbón en China son afectadas con frecuencia por la circulación de agua a través de grietas y zonas de fallas, con el propósito de prever esta situación se realizó un estudio para conocer el comportamiento de los flujos de agua a medida que se realizaba el laboreo minero. Los investigadores Zhang y Shen realizaron una modelación física del comportamiento de la altura de la columna de agua utilizando la ecuación siguiente:

$$H := \frac{100 \cdot M}{a \cdot M + b} \cdot c \quad (1)$$

Donde:

H) altura máxima de la columna de agua desde el techo, m; M) espesor de la capa de carbón a arrancar; a y b) coeficientes que dependen de las características litológicas del estrato, y c) coeficiente que considera la desviación cuadrática media del espesor de la capa de carbón.

Los autores realizaron una modelación física y numérica de varias situaciones (rocas fuertes, medianamente fuertes y débiles), logrando predecir el comportamiento de la columna de agua sobre la parte laboreada y con ello la presión hidrostática. Obviamente es muy importante conocer el comportamiento previo de la presión hidrostática en la zona laboreada, pero el autor de esta tesis considera que los investigadores no evaluaron en ningún momento la situación ambiental que se crea al hacer descender el manto freático ni abordaron la

necesidad de restablecer el mismo a una distancia tal que el agua no afecte la explotación minera o la construcción de galerías mineras.

El túnel Suizo bajo el paso de San Gotardo se construye por debajo de Los Alpes, el arranque se realiza por el método mecánico y se aplican explosivos en algunos tramos donde la calidad de la roca sea muy mala, con abundante afluencia de agua, según la clasificación de Barton (podrían llegar al túnel hasta 1000 litros/seg de agua). Para evitar la inundación de la obra en la etapa de construcción, se diseñó un sistema de bombeo que elevará el agua a más de 850 metros y para la etapa de explotación se colocará detrás del revestimiento, otro sistema para controlar el agua (Ganz, 2005). Resulta interesante desde el punto de vista técnico, el empleo del método de bombeo como técnica para controlar el agua subterránea, ya que a partir de la experiencia cubana en la utilización de sistemas de bombeo en minas subterráneas de cobre (Matahambre y El cobre), éste aumentaba los costos y afectaba la rentabilidad de las empresas mineras, siendo una de las causas del cierre de las minas. El autor de esta tesis considera que el gasto por concepto de control de agua en el túnel Suizo pudo ser menor de haberse aplicado de forma puntual, otros métodos por ejemplo inyección en los tramos de mayor afluencia de agua, acción que contribuiría a minimizar el impacto ambiental del bombeo.

Algunos túneles construidos en Moa no contaban con un sistema para controlar el agua ya que tanto el suelo como las rocas se comportan como acuífugos, sin embargo en el 2005 se produjo una inundación parcial en una de estas obras que provocó su paralización por 4 días, ver figura 1. Para evitar que se repitiera esta situación, se diseñó un sistema de zanjas de desagüe con pozos colectores en forma de dren francés; estos últimos se calcularon a partir del escurrimiento subterráneo medio, consecuencia de la media superior de las lluvias registradas en Moa para los últimos 5 años.(Santiago & Cuesta, 2005).



Figura 1 Se indica el nivel alcanzado por el agua producto a una inundación parcial en el túnel 1

S Coulter y C D Martin publicaron un trabajo en el que muestran la efectividad de la aplicación del método de inyección con mullido del terreno (jet grouting) para controlar la estabilidad y el agua en un túnel bajo un Glaciar en Suiza (Coulter & Martin, 2006a), más tarde en otro trabajo (Coulter & Martin, 2006b), describen causas por las que aparecen

deformaciones en las rocas y las relacionan con la presión de inyección, sin embargo los investigadores no analizan la probable disminución de la resistencia del macizo rocoso debido a la presencia de agua, que hace que disminuya este parámetro en la misma magnitud de la presión ($\gamma_{\text{agua}} \times H$), aspecto que podría constituir otra de las causas que inciden en la fragmentación adicional del macizo. De este trabajo se deriva la importancia de considerar las propiedades de resistencia de las rocas y su variación ante la presencia de agua, con lo que se podrán evitar deformaciones en las rocas y/o un agrietamiento adicional a causa de la presión excesiva de inyección.

G Anagnostou en su trabajo "Tunnel Stability and Deformation in Water-Bearing Ground" describe las principales formas de pérdida de estabilidad y deformaciones plásticas que ocurren en excavaciones subterráneas afectadas por las filtraciones de agua. El autor detalla los fenómenos de deslizamiento en el frente y techo de la excavación, subsidencia y consolidación a causa del drenaje del acuífero, la fracturación adicional a causa del exceso de presión durante el proceso de inyección en zonas débiles saturadas y las deformaciones laterales e hinchamiento por el piso de la excavación (Anagnostou, 2006). En el trabajo se demuestra la influencia decisiva del agua en la estabilidad y deformación del contorno de la excavación, y manifiesta la necesidad de utilizar un modelo apropiado para estudiar los fenómenos descritos; sin embargo el autor de esta tesis considera que en el trabajo no se recoge la necesidad de evitar que el agua llegue al contorno de la excavación y con ello atenuar o evitar que se produzcan estos fenómenos.

1.2 Caracterización de las filtraciones de agua en el macizo rocoso.

Para interpretar correctamente los procesos de filtración e infiltración y el comportamiento del conjunto macizo excavación ante la presencia del agua, es necesario conocer el origen del agua subterránea y las principales teorías utilizadas para la caracterización paramétrica de los flujos subterráneos, los aspectos y características del terreno que inciden en los procesos, así como algunos software utilizados para la modelación y simulación de los flujos hidrográficos e hidrogeológicos.

En una época tan temprana como 600 a.n.e, filósofos como Tales Mileto y Platón ya tenían teorías sobre el origen de las aguas subterráneas, sin embargo según la literatura, el tratamiento al ciclo completo del agua fue abordado entre otros científicos por el francés Bernard Palisay quien demostró que el origen de los ríos y las aguas subterráneas está en las lluvias lo que fue confirmado más tarde por Pierre Perrault y Edmé Mariotté, (De_Miguel, 1999; Bernabé, 2006; Infante et al., 2007).

Resulta de vital importancia conocer los aspectos que inciden en los procesos de infiltración, filtración y control del agua. Gilbert Castany representa gráficamente la forma en que se relaciona la lluvia con las escorrentías superficiales, infiltración, escorrentías subterráneas, la evapotranspiración y evaporación (Castany, 1971), siendo de especial interés para este trabajo los aspectos que inciden en el proceso de infiltración y filtración del agua además de las leyes que caracterizan estos procesos en el interior de los macizos rocosos fuertes poco porosos y agrietados.

Este trabajo está orientado a macizos en los que el agua subterránea circula principalmente a poca velocidad a través de las grietas, manteniendo un régimen laminar, por tal razón la ley de Darcy enunciada por el autor en 1856, conocida como ley fundamental de las filtraciones o los flujos subterráneos, será referida con frecuencia. No forman parte de nuestro objeto de investigación los macizos rocosos en los que el agua circula a través de grandes grietas y otras oquedades con un movimiento caracterizado por el desorden de las partículas y una alta velocidad (régimen turbulento). Este tipo de régimen es estudiado por otras leyes y criterios como los propuestos por J. Dupuit en 1857, o el aporte realizado por Osborne Reynolds en 1883 quien determinó paramétricamente la diferencia entre los flujos laminar y turbulento; en Cuba el Dr. Cs Diosdado Pérez Franco ha publicado varios trabajos relacionados con esta temática aplicada a la captación de agua en pozos (Franco et al., 1996; Franco, 2002).

E Hoek y H Brown tratan el tema de la estabilidad de las excavaciones, la presión que debe soportar el revestimiento y cómo seleccionar el mismo para diversas condiciones. En las propuestas para estimar la presión minera, no consideran la carga adicional que genera la presión hidrostática; tampoco consideran el efecto a largo plazo de la acción del agua sobre la calidad del macizo y revestimiento de la excavación subterránea, (Hoek. & Brown., 1986),

Estos aspectos no considerados han contribuido a la ocurrencia de derrumbes y daños en equipos, entre otras consecuencias, en obras del complejo hidráulico que se ejecuta en Mayarí (Trincado et al., 2005b).

Roberto Blanco en su libro " Construcción de Pozos en Condiciones Minero-Geológicas Difíciles ", describe de forma didáctica un grupo de técnicas para controlar el agua que afecta la construcción de pozos, y detalla los elementos fundamentales que se deben tener en cuenta para proyectar los trabajos de inyección, muchas de estas técnicas se aplican en el laboreo de excavaciones horizontales (Blanco, 1995). Sin embargo cuando el autor realiza el análisis de las rocas ligadas y desligadas en su capítulo I, no toma en consideración que la presencia de agua en las oquedades y poros de las rocas ligadas y el espacio entre partículas en las rocas sueltas, disminuye su esfuerzo al cortante (τ).

Las obras de Custodio y Llamas además de las de Constantino de Miguel, constituyen una guía para comprender los procesos de infiltración y filtración de agua en el terreno (suelo o macizo rocoso) (Custodio & Llamas, 1997; De_Miguel, 1999). Para esta tesis, las propuestas realizadas para determinar el caudal de infiltración mediante la utilización de la ley de Darcy, además de otras expresiones para estimar la permeabilidad del macizo rocoso o suelo, resultan importantes.

El "Manual de Túneles" es una obra que se concibió para orientar a los constructores y diseñadores sobre los principales trabajos a realizar durante la construcción de una obra subterránea (Geoconsult, 1996), sin embargo, al tratar el tema de la impermeabilización de obras subterráneas se limitan a señalar las principales técnicas, y no se abunda sobre las condiciones de aplicación de cada una de éstas, tampoco se propone un procedimiento para seleccionar la técnica adecuada en función de las características de la excavación y del macizo rocoso.

El Manual de Túneles editado por Carlos López Jimeno, en el que participan prestigiosos especialistas en materias relacionadas con la construcción de túneles (López-Jimeno et al., 1997), es uno de los materiales publicados y editados en español más importante en esta temática. En su capítulo "Desagüe e Impermeabilización de Túneles" se abordan varios

conceptos y parámetros necesarios para comprender el proceso de infiltración de agua a una excavación, proponen algunos aspectos a considerar para seleccionar las técnicas de control del agua que afecta una excavación subterránea, pero se basan fundamentalmente en la magnitud de las filtraciones. El autor de esta tesis considera que para elegir una técnica se deben incluir en el análisis otros aspectos como calidad del terreno, profundidad de ubicación del túnel, además de otro grupo de técnicas importantes para el tratamiento del agua, por ejemplo, la inyección o taponamiento que es tratada independientemente como alternativa para tratamiento del terreno en el capítulo 17.

Del libro “Ingeniería Geológica” sus capítulos: Mecánica de Roca y Suelo, Descripción del Macizo Rocos, Hidrogeología, Investigaciones in situ, Mapas Geotécnicos y Túnel, constituyen una herramienta muy completa para realizar las investigaciones previas a la construcción de una excavación subterránea, además en el capítulo 10 “Túneles” se definen aspectos a considerar durante el estudio hidrogeológico, cuando éstos pueden ser afectados por agua (González_de_Vallejo. et al., 2002).

El libro publicado por H Gavilanes y B Andrade es un material muy didáctico y útil para la caracterización geomecánica de los macizos rocosos, pero no profundiza en los aspectos relacionados con el control del agua, limitándose a exponer los principales métodos, sin definir las condiciones de aplicación, ni proponer un procedimiento para la utilización de algunos de éstos (Gavilanes. & Andrade., 2004).

En la serie de libros “ Ingeniería de Túneles “, se describen proyectos de construcción de túneles, en los que se incluyen soluciones a problemas relacionados con el agua que afecta estas obras en las etapas de construcción y explotación, pero no se presenta un procedimiento para elegir la técnica de control de las filtraciones (López-Jimeno. et al., 2004); también se trata el tema de la selección del sostenimiento a partir de las clasificaciones geomecánicas, sin puntualizar que cuando esta selección se realiza en condiciones hidrogeológicas complejas, se le debe dar al agua un tratamiento diferenciado para garantizar la durabilidad de la construcción.

En el trabajo “Ground Behaviour and Rock Mass Composition in Underground Excavations” los autores realizan un análisis de las principales características y propiedades que inciden en el comportamiento de un macizo rocoso (características del agrietamiento, propiedades másicas, esfuerzo que soporta la roca, su textura, geometría de los granos formadores de la roca, presencia de agua) y su influencia en el diseño de una excavación subterránea, a partir de lo cual se evalúa el comportamiento del macizo antes de laborear la excavación y después de laboreada, aspecto mostrado en varios diagramas (Stille & Palmström, 2008). Aunque los autores en el trabajo reconocen que el agua hace más compleja la predicción del comportamiento del macizo luego de ejecutada la excavación, no analizan la necesidad de proponer soluciones para controlar el agua, lo que no permite la predicción del comportamiento del conjunto macizo excavación.

En el trabajo “Influence of the Depth and Shape of a Tunnel in the Application of the Convergence–Confinement Method” Los autores incluyen los parámetros profundidad y forma de la excavación en la aplicación del método de convergencia; la expresión siguiente fue la base del trabajo.

$$\sigma = (1 - \lambda) * \sigma_0 \quad (2)$$

Donde: σ_0) - tensión natural del macizo y λ)- coeficiente de pérdida de confinamiento (varía entre 0 – 1) y depende principalmente del tipo de macizo.

La autores a partir de la expresión propuesta por Panet en 1995 para determinar (λ), introducen en la ecuación 17 de su trabajo los parámetros a,b,c que consideran el tipo y forma de excavación representado, (González-Nicieza et al., 2007). El sentido físico de los parámetros incluidos se manifiesta en los gráficos de convergencia obtenidos, sin embargo el autor de esta tesis opina que no haber considerado la presencia de agua, introduce variación en los valores de esfuerzo que soportan las rocas, y por tanto los sostenimientos propuestos podrían estar sub-dimensionados. Por otro lado, los macizos elástico y elástico plástico, ante la presencia de agua, no reaccionan de la misma manera cuando son laboreados.

Mohamed El.Tani realiza un análisis del caudal de agua que se infiltra en un túnel circular construido en un acuífero ideal donde considera las siguientes variables: influencia de la columna de agua (h), radio de la excavación (r) y flujo que se infiltra (El.Tani, 2003), este aspecto ya había sido tratado por varios investigadores como Goodman, Karlsrud y Lombarda entre otros. El Tani en este trabajo introduce un nuevo parámetro λ que lo define como:

$$\lambda = \frac{h}{r} - \sqrt{\frac{h^2}{r^2} - 1} \quad (3)$$

y simplifica la ecuación (3) propuesta en 1999 a la siguiente expresión:

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot k \cdot \frac{\lambda^2 - 1}{\lambda^2 + 1} \cdot \frac{h}{\ln \lambda} \quad (4)$$

En el trabajo se realiza un análisis de la influencia de la profundidad en el comportamiento de la infiltración del agua y la presión hidrostática. Aunque en la publicación hace referencia a la necesidad de controlar la presión y el flujo de agua que penetra a una excavación, no propone soluciones para controlar ambas variables, con lo que se podrían evitar las afectaciones que esto produce, Kolymbas y Wagner realizan un análisis similar y proponen una expresión para determinar la presión de la filtración de agua actuante sobre el revestimiento, muy similar a la propuesta por El Tani, pero Kolymbas y Wagner sí plantean a modo de conclusión, que determinar este parámetro permite conocer la presión en los conductos de drenaje y realizar su diseño, además de estimar el impacto ambiental producido por el drenaje y el descenso del nivel acuífero (Kolymbas & Wagner, 2006). El autor de esta tesis considera que esta expresión propuesta por Kolymbas puede ser aplicada cuando existe afluencia de agua en un túnel y se utiliza el hormigón lanzado como revestimiento, ya que la presión con que este último llega a las grietas tiene que ser muy superior a la presión del agua.

(Weia et al., 1995) en el trabajo estudian la forma de predecir la permeabilidad en un macizo rocoso a partir del volumen de espacios vacíos; este estudio es aplicable a macizos sueltos donde el agua se desplaza por los poros interconectados; en los macizos fuerte poco porosos y agrietados no es aplicable al no estar todas las grietas interconectadas. El autor de esta tesis considera que en macizos fuertes, agrietados y poco porosos este tipo de aproximación debe correlacionarse con otros parámetros que son proporcionales a la permeabilidad como son: espaciamiento entre grietas, persistencia y abertura de las grietas.

La afectación a las propiedades de resistencia por la presencia de agua en los macizos rocosos es un aspecto tratado por varios especialistas; el autor de esta tesis comprobó que para los macizos formados por rocas básicas y ultra-básicas el agua incide muy poco en su calidad a

corto plazo (Cuesta., 1999). Más tarde, tras comprobar a través del coeficiente de reblandecimiento, que el agua afecta sensiblemente las propiedades de resistencia en estos macizos, propuso un procedimiento basado en la correlación existente entre permeabilidad y calidad del macizo que permite elegir el sistema de control del agua y evitar las afectaciones que se producirían en el conjunto macizo_excavación (Cuesta et al., 2007; Cuesta et al., 2008).

Z. Li y D.J. Reddish (Z. Li & Reddish, 2004) realizaron una evaluación del efecto del agua en las rocas fuertes, agrietadas y poco agrietadas y en ambos casos demuestran experimentalmente que el ángulo de fricción interna de las rocas disminuye con el aumento de su grado de saturación. Plantearon que en los macizos agrietados el proceso de deterioro de sus propiedades se realiza a mayor velocidad. Zhang conjuntamente con otros colegas describieron una situación similar para una mina de carbón en China (Zhang et al., 2004). El autor de esta tesis considera que aun cuando se corrobora la necesidad de prestar especial atención al control del agua, los autores no propusieron soluciones para evitar las afectaciones que se producen en estas condiciones.

A partir de las ecuaciones propuestas por varios autores se deduce la influencia de las características del macizo en la circulación del agua por éste. En el libro “Flujo de Agua por las Discontinuidades de las Rocas” se presentan varias de las ecuaciones utilizadas para determinar el caudal de filtración y coeficiente de filtración, que por su simplicidad y calidad de los resultados han obtenido gran difusión (C. Lee & Farmer, 1993). En el texto no se toman en consideración otras ecuaciones muy conocidas como las propuestas por Bear o la de Barton y Bray muy utilizadas actualmente (Hoek & J, 1981; Bear et al., 1993).

$$\text{Ecuación propuesta por Hoek \& Bray 1981 } k = \frac{g \cdot e}{12 \cdot \nu \cdot b} \quad (5)$$

$$\text{Ecuación propuesta por Bear et al., 1993 } k = \frac{e^3}{12 \cdot b} \quad (6)$$

Donde:

e : abertura de la grieta o junta, mm.

ν : viscosidad del agua (0.0101 cm²/seg) a 20° centígrados.

g : aceleración de la gravedad, m/s²

b : espaciamiento entre grietas. mm

Las ecuaciones 5 y 6 pueden ser utilizadas para determinar la permeabilidad entre pozos de perforación y con ellos densificar la red de datos cuando se evalúan macizos rocosos fuertes poco porosos y agrietados. Los mejores resultados se han obtenido con la expresión propuesta por Barton y Bray. En estas expresiones las características del agrietamiento (espaciamiento abertura y persistencia) son algunos de los aspectos que se deben considerar cuando se trata el tema del control del agua que afecta una excavación subterránea laboreada en un macizo rocoso poco poroso y agrietado, y que fueron tomados en consideración durante el desarrollo de esta investigación.

M Bai y otros en 1996 investigaron la incidencia de la permeabilidad en la resistencia de la roca, pero no se proyectaron en la necesidad de su control para evitar que las propiedades de las rocas se deterioren en el tiempo (Bai et al., 1996). En el trabajo analizan la permeabilidad a partir del agrietamiento del macizo, tomando como punto de partida la ecuación propuesta por (Bear et al., 1993, e incorporaron la dirección del agrietamiento y la viscosidad del agua.

$$k_{xy} = \sum_{l=1}^n \frac{b_l^3}{12 \cdot \mu \cdot s_l} \cdot \cos^2 \alpha_l \quad (7) \quad (\text{Bear et al., 1993}).$$

Donde:

μ -viscosidad del agua, α -dirección de las grietas de la familia l, n- numero de familias de grietas.

J. Laginha Serafim realizó un análisis de la influencia de la porosidad y el agrietamiento para determinar la permeabilidad del macizo y a partir de la ley de Darcy dedujo la influencia de ambos parámetros en las características hidrogeológicas del macizo rocoso (Serafim, 2000), expuso además una expresión similar a las propuestas por Bear y Bai en 1993 y 1996 respectivamente para determinar la permeabilidad (Bear et al., 1993; Bai et al., 1996). Esta ecuación puede ser utilizada para densificar los datos de permeabilidad en los sitios donde no existe cala de perforación.

$$k = \frac{b^3 \cdot \gamma_w}{12 \cdot d \cdot \mu} \quad (8)$$

Donde: γ_w - densidad del agua

μ -viscosidad del agua

Xuefeng Chu y Miguel A. Marino analizaron experimentalmente el comportamiento de la infiltración de lluvia y su tendencia a aumentar hasta el momento en que el macizo se satura, además representaron la curva que caracteriza la filtración, ver figura 2 (Chu & Marino, 2005), este proceso continúa aun después de saturado el macizo, sólo que el fenómeno se denomina percolación.

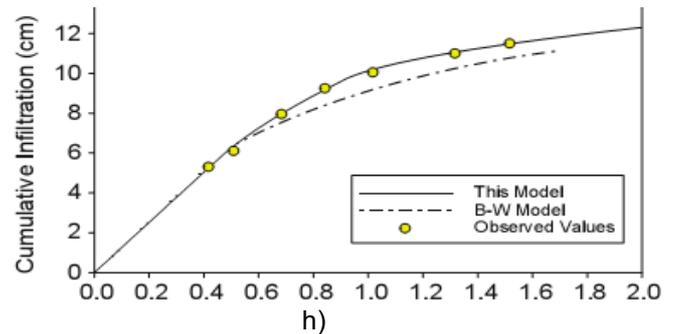


Figura 2 Comportamiento del acumulado de infiltración de agua en el suelo con respecto al tiempo (Chu & Marino, 2005)

Conocer el momento en que comenzará a aumentar la filtración de agua a una excavación subterránea, su volumen o el momento en que aumentará el escurrimiento superficial, a causa de la saturación de los macizos rocosos, es importante entre otras cosas, para poder prevenir la inundación de emboquilles de túneles o su incidencia en la efectividad de los sistemas de desvío de las aguas superficiales.

Javier Sánchez San-Ramán describe el método racional en que a partir de los registros de lluvias determina el volumen de agua que se escurre por la superficie y el que se infiltra en el terreno (San-Ramán, 2006). Para esta tesis la importancia del trabajo radica en que este proceso de infiltración producto de las lluvias, puede afectar una obra construida por encima del nivel acuífero y aporta los elementos principales para el diseño y aplicación del método de desvío de las aguas superficiales, método que es utilizado ocasionalmente para construir un túnel en el área de influencia de ríos o arroyos.

A. Lipponen y otros investigadores realizaron un análisis de varios factores geológicos que al combinarse con las filtraciones de agua producen inestabilidad en el conjunto macizo excavación. Al evaluar las zonas afectadas en el túnel Paijänne, detectan que en las mismas coinciden áreas de debilitamiento estructural, agrietamiento intenso y un sostenimiento inadecuado, lo que provocó que el agua erosionara varios tramos del túnel. Como resultado de la inspección del túnel y las investigaciones geotécnicas, obtuvieron un Sistema de Información Geográfica que permitió identificar las zonas con riesgos de afectación por la combinación del agua y los aspectos geológicos antes mencionados (Lipponen et al., 2005).

Un procedimiento similar, al que se incorporaron otros mapas temáticos, fue aplicado por el autor de esta tesis en el túnel Yagrupal-Guaro del trasvase de Mayarí, donde se superpusieron mapas de fallas, calidad del macizo, permeabilidad, dirección de escorrentías superficiales y presión hidrostática, obteniéndose un resultado similar al obtenido por Annukka Lipponen, por lo que la conformación del Sistema de Información Geográfica constituye una herramienta para predecir el comportamiento de las obras subterráneas ante la acción combinada de las filtraciones y otros fenómenos geológicos (A Cuesta et al., 2009).

En el trabajo “ Estudio de la fuerza de la filtración que actúa sobre el revestimiento y frente de túneles ubicados a poca profundidad “(In Mo Lee & Nam, 2001), los autores luego del análisis y la modelación del efecto del agua sobre el revestimiento, determinan las propiedades de resistencia y otras características que debe tener el hormigón lanzado a aplicar en zonas propensas a afectaciones por el agua. En el trabajo se analizan tres condiciones: drenaje del túnel sin considerar grandes flujos de agua, drenaje del túnel con presencia de grandes flujos de agua e impermeabilización del túnel. Se demostró que cuando se utiliza la técnica de drenaje se disminuye la fuerza que actúa sobre el revestimiento en un 20 % menos que cuando se realiza la impermeabilización total. Con la solución del drenaje no sólo se disminuye la presión sobre el revestimiento, sino que se mejora la estabilidad, aspecto importante en la etapa de construcción.

Kim Yong-IL conjuntamente con otros investigadores, analizaron el efecto del agua en la estabilidad de los túneles y propusieron un software para modelar el proceso, a partir de lo cual proyectan los trabajos de reforzamiento con la utilización de hormigón lanzado y sistemas de anclado, con lo que lograron la estabilidad del túnel, y lo demostraron a través de un caso de estudio (Yong-IL et al., 1999). El autor de esta tesis considera que en el trabajo no se analizó la posibilidad de controlar el agua y lograr la estabilidad al evitar el contacto de ésta con el contorno de la excavación, con lo que se preserva la calidad del macizo y se disminuye la intensidad de su deterioro a largo plazo.

Molinero Huguet, Francisco Calvete Samper y Rubén Juanes Silva (Huguet et al., 2000) realizaron un estudio para un laboratorio subterráneo afectado por el agua, a partir de su investigación realizan modelación en 2D y 3D del impacto que produce el agua durante el

laboreo de una excavación en un macizo fracturado y resaltan la importancia de conocer con precisión las zonas de fracturación (meso, macro y micro) para predecir el comportamiento dinámico del agua subterránea que afectaría un túnel, utilizan además métodos analíticos para determinar algunos parámetros como caudal de infiltración y permeabilidad. Para calibrar el modelo numérico utilizado, se basan en los datos de las perforaciones geológicas por su concordancia con la realidad hidrogeológica del área, sin embargo no analizan como controlar el agua ni proponen vía o forma de selección de técnicas para evitar las afectaciones que produce, aspectos que el autor de esta tesis considera necesario evaluar cuando se construye en un macizo fracturado afectado por el agua.

Son varios los investigadores que coinciden en identificar un grupo de factores relacionados con la dinámica del agua subterránea (geológicos, geotécnicos, medio ambientales, constructivos y económicos), que deben ser considerados en el momento de investigar su comportamiento, controlar su afluencia a los túneles, diseñar, construir y explotar una excavación subterránea. (Camberfort, 1968; Castany, 1971; Anónimo, 1982; Bear et al., 1993; Blanco, 1995; Anagnostou, 1996; Bai et al., 1996; Araújo et al., 1998; De_Miguel, 1999; Yury Almaguer, 2001; González_de_Vallejo. et al., 2002; Goodman & Kieffer, 2002; El.Tani, 2003; Anónimo., 2004; Anónimo_0, 2004; Anónimo_16, 2005; González, 2005; Anagnostou, 2006; Dirección_De_Cuencas_Hidrográficas & Servicio_Hidrológico_Nacional, 2007a; Esterhuizen & Karacan, 2007). El autor de esta tesis elaboró un esquema que recoge los factores más importantes (anexo I,1), para una mejor interpretación de los aspectos que inciden en los procesos de filtración, infiltración y control del agua que afecta una excavación subterránea (Cuesta et al., 2007).

M. Diaz Canales y Lugo Olmos describen el proyecto de un túnel para trasvasar agua, sin embargo el aspecto relacionado con la estanqueidad y la impermeabilización, fundamentales para este tipo de obras subterráneas, no son tratados en el trabajo (Canales & Olmos, 1998), de lo que se puede inferir que el tratamiento del agua se analiza casuísticamente y no de forma preventiva, o que se consideró que no constituía un factor de riesgo para la construcción.

En el trabajo "Estudio Geológico Geotécnico del Túnel de Bracons" (J M Galera Fernández et al., 2001) se realiza una evaluación integral de la obra, donde las condiciones hidrogeológicas

MSc. Armando Francisco Cuesta Recio

son desfavorables y se hacen más complejas al combinarse con rocas débiles; sin embargo, al concluir sólo se hace énfasis en el tipo de sostenimiento propuesto para la obra a partir de las clasificaciones geomecánicas, no se particulariza en la necesidad de controlar el agua en las zonas susceptibles a fenómenos relacionados con la presencia de ésta. El autor de esta tesis considera que la identificación, desde la etapa de proyecto, de estas zonas en la traza del túnel, pueden determinarse a través de un Sistema de Información Geográfica o superposición de mapas con un alto grado de concordancia (A Cuesta et al., 2009).

Krishna Kanta Panthi en su trabajo doctoral realiza un análisis del nivel de coincidencia de los datos relacionados con la estabilidad para una obra, (obtenidos del estudio ingeniero geológico) y lo constatado en el momento de la ejecución. Uno de los resultados del trabajo es la metodología basada en el análisis estadístico, utilizada para disminuir el nivel de discordancia entre los datos obtenidos en diferentes etapas. Entre los aspectos que se analizan y guardan relación con la estabilidad del macizo, se encuentra el agua subterránea, la calidad del macizo, los esfuerzos sobre el revestimiento y su variación al construir la excavación (Panthi, 2006); El autor de esta tesis opina que a pesar de considerar la influencia del agua en la estabilidad del conjunto macizo-excavación, no analiza la posibilidad del aumento de la estabilidad a partir de su control.

Varios investigadores para predecir la ocurrencia de un fenómeno en macizos rocosos, recurren a la evaluación de la peligrosidad y riesgos. En el caso de las excavaciones subterráneas los análisis se han concentrado en las explosiones de la atmósfera subterránea. En este caso los fenómenos asociados a la presencia de agua también pueden ser evaluados.

La **susceptibilidad** consiste en la predisposición del terreno desde el punto de vista espacial (área) a la ocurrencia de un fenómeno (desprendimiento, deslizamiento, erosión, inundación, etc), no implica el aspecto temporal del fenómeno (Santacana, 2001; Y Almaguer, 2005), y constituye uno de los factores para evaluar la **peligrosidad**, que es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente perjudicial dentro de un período de tiempo determinado y en un área específica.

En investigaciones desarrolladas por (Hansen, 1984; Corominas, 1987; Hartlén & Viberg, 1988; Corominas, 1992; Carrara et al., 1995; Leroi, 1996) se realizan análisis y evaluaciones de riesgos por deslizamientos en taludes, en los cuales se expresan los resultados cartográficamente a partir de la identificación de los factores condicionantes de la susceptibilidad, lo que plasman en mapas que posteriormente se combinan.

Entre los métodos que existen para evaluar la susceptibilidad en obras de superficie se encuentran: *heurísticos, probabilísticos y geomorfológicos* (Y Almaguer, 2005; Bonachea, 2006; Nandi & Shakoor, 2010). En la bibliografía consultada por el autor de esta tesis, no se ha encontrado referencia a la aplicación de estos métodos para evaluar, en excavaciones subterráneas, la susceptibilidad a la ocurrencia de determinados fenómenos relacionados con la presencia de agua (pérdida de estabilidad, inundaciones, deterioro de las propiedades de resistencia, entre otros).

Los *métodos heurísticos* se basan en el conocimiento a priori de los factores que producen inestabilidad en el área de estudio. Los factores son ordenados y ponderados según la importancia asumida o esperada en la formación de deslizamientos (Carrara et al., 1995). El principal inconveniente de estos métodos radica en que, la efectividad depende de la experiencia y conocimiento del experto sobre los factores ambientales que pueden causar inestabilidad o deslizamientos. Otra variante de este método es el análisis cualitativo basado en la combinación de mapas de factores que permite la regionalización de zonas susceptibles, y se puede combinar con los métodos de expertos (Carrara et al., 1995). El análisis heurístico introduce un grado de subjetividad que en ocasiones imposibilita comparar documentos elaborados por diferentes autores para una misma zona, si no se argumenta adecuadamente cada factor condicionante.

Las aproximaciones *probabilísticas* se basan en la relación observada entre cada factor y la distribución de deslizamientos actuales y pasados (Carrara et al., 1995). Se utilizan cuando se dispone de abundante información, tanto cualitativa como cuantitativa, aplicándose para la correlación los modelos estadísticos, que pueden ser simples o multivariantes. La principal ventaja es la objetividad del método. La potencia de los métodos probabilísticos depende directamente de la calidad y cantidad de los datos adquiridos.

Los **métodos geomorfológicos** se basan en la determinación de factores condicionantes de los fenómenos mediante técnicas geomorfológicas, cartográficas y de zonificación. La principal ventaja, si se realizan por un buen experto, es la validez y detalle del análisis y mapas resultantes. La elaboración de estos mapas exige conocer la morfología y tipología de los fenómenos (Hansen, 1984; Hansen y Frank, 1991). Para este tipo de cartografía, básica para la mayor parte de las técnicas restantes, resulta de vital importancia el conocimiento y experiencia práctica del experto.

Según la experiencia del autor de esta tesis es posible la aplicación de los métodos Heurísticos y Geomorfológicos en construcciones subterráneas, comprobada su efectividad en túneles del trasvase Este Oeste que se construye en Mayarí (A Cuesta et al., 2009).

I.3 Técnicas para controlar las filtraciones de agua a las excavaciones subterráneas.

En la actualidad existen varias técnicas para controlar las filtraciones de agua que afectan una excavación subterránea, las que se han desarrollado como consecuencia de la necesidad de construir en condiciones hidrogeológicas difíciles, satisfacer las exigencias de la obra contratada, o solucionar problemas relacionados con el agua que surge durante la construcción o explotación de la misma.

Para realizar un mejor estudio de las técnicas para el control de las filtraciones, varios investigadores las han agrupado (Blanco, 1995; López-Jimeno et al., 1997). A partir de las condiciones tropicales de nuestro país y la propuesta realizada por López Jimeno, se propone agrupar las técnicas para controlar las filtraciones de la forma siguiente:

- Técnicas para la disminución del grado de permeabilidad del terreno.
- Técnicas para el drenaje por gravedad de las aguas subterráneas.
- Técnicas para elevar el grado de impermeabilidad del revestimiento o fortificación.
- Técnicas para la desviación o derivación de las aguas superficiales.
- Técnicas para el descenso forzado o abatimiento del nivel del manto freático.

Técnicas para la disminución del grado de permeabilidad del terreno.

La disminución de la permeabilidad se puede lograr al disminuir la porosidad efectiva, mediante la aplicación de las siguientes técnicas:

- | | |
|--|---------------------------------------|
| 1- Compactación o consolidación del terreno. | 3- Inyección con mullido del terreno. |
| 2- Inyección de macizos rocosos y suelos o taponamiento. | 4- Congelación del terreno. |

Compactación o consolidación del terreno: se utiliza cuando se quiere evitar que las aguas superficiales se infiltren y afecten obras subterráneas; con esta técnica se pueden lograr dos propósitos: estabilización y disminución de la permeabilidad; se aplica efectivamente en macizos sueltos y suelos.

Inyección: una de las técnicas más conocidas, su desarrollo comienza a partir del siglo XIX cuando el francés Brenca realiza con éxito sus primeras aplicaciones. Herry Camberfort realizó los mayores aportes a la técnica en el pasado siglo y planteó lo siguiente “La inyección es un procedimiento de construcción que todo ingeniero debe conocer” (Camberfort, 1968).

La determinación de la presión óptima de inyección, la magnitud de la zona de inyección, el tiempo de fraguado y la calidad de las inyecciones, son temáticas de las más tratadas por los especialistas.

Para evaluar la calidad del macizo luego de realizar la inyección, Johansen, P.M propone una expresión a partir de correlacionar el índice Q propuesto por Barton, para lo que considera la presión y caudal de inyección como se muestra en la siguiente expresión (Dalmalm, 2004).

$$Q_i = \frac{RQD}{J_n} \cdot J_r \cdot J_a \cdot \frac{1}{1 + lugeon} \quad (9)$$

Donde:	RQD	Índice de calidad del macizo rocoso.
	J _n	Índice de diaclasado.
	J _r	Índice de rugosidad de las grietas.
	J _a	Índice de alteración de las grietas.

Esta correlación ayuda a estimar la calidad de la inyección entre taladros de comprobación.

Dalmalm, en su tesis propone un diagrama en el que se exponen los aspectos que inciden en el sellado y tiempo de fraguado cuando se aplica la técnica en túneles. El investigador toma en cuenta la presión de inyección pero no considera las propiedades de resistencia dentro de los

parámetros necesarios para caracterizar el macizo; a pesar de la omisión señalada, la metodología propuesta es aplicable en nuestras condiciones.

Rikard Gothäll analiza la respuesta del macizo rocoso ante las altas presiones de inyección y la necesidad de considerar la presión hidrostática para evitar un agrietamiento antrópico no deseado a consecuencia del exceso de presión (Gothäll, 2006). En este trabajo se resalta la importancia que tiene la presión hidrostática caracterizada por la profundidad y densidad del agua, aspectos que no siempre son considerados, aunque, en opinión del autor de esta tesis, no se muestra si la presión de agua en los poros y grietas es considerada en la disminución de las propiedades de resistencia, aspecto que puede contribuir al agrietamiento antrópico no deseado.

S Coulter y C D Martin analizan el impacto en la superficie de inyecciones realizadas en un túnel construido en rocas de mala calidad a poca profundidad, donde las presiones causaron daños a cimientos en obras de superficie (Coulter & Martin, 2006a). Se considera por el autor de esta tesis, que no sólo se debe tomar en cuenta el impacto producido en la superficie por esta técnica utilizada para controlar las filtraciones, sino que se debe prestar especial atención también a sus posibles impactos en el régimen hidrogeológico.

Inyección con mullido del terreno (jet grouting): se aplica fundamentalmente en suelo, macizos sueltos y medianamente fuertes. Acerca de la aplicación y el mejoramiento de su efectividad, autores como: J K Kim, N Kotake, Seth Pearlman, entre otros, han publicado numerosos trabajos, en los que se reconoce la efectividad de la técnica y lo costosa que resulta su aplicación debido al gran número de perforaciones necesarias (Kotake et al., 1995; Pearlman, 1998; Kim et al., 2006), por tal razón y considerando que otras técnicas como la inyección se aplican en condiciones similares, el autor de esta tesis sugiere que su aplicación debe valorarse en casos donde no exista otra alternativa.

Congelación del terreno: no es aplicable en zonas tropicales debido al alto consumo de energía.

Técnicas para el drenaje de las aguas subterráneas.

Con este grupo de técnicas no se logra la impermeabilidad total de la obra, sino que se encausan importantes flujos para que el agua afecte lo menos posible al conjunto macizo

excavación, el drenaje desmedido puede ser causante de fenómenos de subsidencia, como sucede en la Ciudad de México, o estructuras viales como carreteras, según expone Morrilla. (Morrilla, 1988).

A este grupo de técnicas pertenecen las siguientes.

- | | |
|---------------------------|--------------------------|
| 1- Las zanjas de desagüe. | 3- Barrenos de descarga. |
| 2- Galerías de desagüe | 4- Oberhasli |

La zanja de desagüe, es el método más barato y conocido, puede ser utilizado en cualquier tipo de excavación subterránea y macizo rocoso (Cuesta, 1997).

Galería de desagüe: es una variante muy utilizada en viaductos y minas subterráneas para evacuar el agua del interior de las obras. En ocasiones se combina con un sistema de barrenos de descarga perforados desde una galería o túnel paralelo a la excavación principal, para lograr que esta última se laboree seca (figura 3).

Investigadores como Arsenio González y Gonzáles de Vallejo describen como ejecutar la variante pero no especifican en qué condiciones resulta idónea su aplicación (González_de_Vallejo. et al., 2002; González, 2005). El autor de esta tesis considera que esta variante puede provocar fenómenos irreversibles a causa de la desecación de



Figura 3. Galería de drenaje en explotación de carbón

determinadas áreas así como cambios irreversibles en el régimen hidrogeológico; además de limitar su uso a situaciones extremas, principalmente en la etapa de construcción, o para evacuar el caudal residual de túneles para transporte o importantes sistemas de obras subterráneas, también puede ser utilizado en zonas en que no afecte sensiblemente el ecosistema debido a las abundantes lluvias.

Taladros o barrenos de descarga: para su aplicación se realizan perforaciones en las paredes y techo de las excavaciones subterráneas, obligando al agua subterránea a circular por éstas, creando alrededor del túnel una zona prácticamente seca (Cuesta, 1997; González_de_Vallejo. et al., 2002).

Y Santiago y A Cuesta proponen complementar esta técnica con pozos colectores (en forma de dren francés) en el interior de túneles de pequeña y mediana sección ubicados por encima

del nivel del manto acuífero para acumular e incorporar al régimen hidrogeológico las aguas captadas por el sistema de taladros (Santiago & Cuesta, 2005), lo que constituye una forma de recargar el manto acuífero a nivel del piso del túnel.

Se considera por el autor de esta tesis que cualquiera de las variantes de descarga que se aplique cuando la excavación se encuentra por debajo del nivel medio del acuífero, producirá un impacto sensible en el régimen hidrogeológico, razón por la cual los proyectistas y ejecutores deben tratar de utilizar esta técnica de forma temporal, y unida a un sistema de recarga artificial.

Oberhasli En las figuras 4 y 5 se muestra el techo de una excavación con la técnica aplicada y las piezas necesarias para el funcionamiento del sistema (Rivas, 2006)



Íteto de Oberhasli aplicado a un túnel



Elementos industriales utilizados en el Método de Oberhasli

La técnica tiene gran aplicación en túneles hidrotécnicos, ferrotúneles, y túneles para transporte automotor por lo efectiva que resulta su utilización. Como inconveniente tiene la necesidad de utilizar personal con alto nivel de especialización, para el proceso de perforación e instalación de las redes de drenaje en el techo y lados de la excavación, además de los costos de las piezas a utilizar. En la actualidad los elementos que forman el sistema (media caña, mangueras, codos, etc.), se fabrican a escala industrial, lo que hace menos costosa la aplicación de la técnica. Su combinación con barrenos o taladros de descarga causa al medio ambiente daños que pueden ser irreversibles, con el agravante de ser una técnica para uso permanente. Un sistema similar es propuesto por (D. Li et al., 2009) quienes aseguran ser menos costoso.

Para disminuir la presión del agua sobre el revestimiento se pueden emplear barrenos de descarga; con este propósito varios investigadores de Korea evalúan la influencia que tiene esta técnica para controlar los efectos negativos del agua y su presión sobre el revestimiento, la aplican en una obra construida en granito poco agrietado, donde el agua circula principalmente a través de las grietas. Para visualizar la modelación en 2D y 3D, basada en el trabajo de Strack en 1989, se utilizó además el software MIDAS GTS. Los investigadores evalúan cómo actúa el agua al variar parámetros de los barrenos (longitud, distribución, inclinación y separación) (Shin et al., 2009). El autor de esta tesis durante la aplicación de barrenos de descarga para controlar el agua en el túnel del Trasvase Este Oeste, comprobó que en los macizos fuertes muy agrietados e intensamente agrietados, se obtienen los mejores resultados, y que se contribuye además con el mejoramiento de la estabilidad del techo y lados de la excavación.

Técnicas para elevar el grado de impermeabilidad del revestimiento o fortificación.

Dentro de este grupo de técnicas se encuentran las siguientes:

- 1- Pinturas de estanqueidad o impermeabilizantes.
- 2- Las geomembranas y/o láminas impermeables (PVC entre otras).

Pinturas impermeabilizantes: son utilizadas generalmente cuando la permeabilidad ($K_e \leq 0,1$ m/día) y la presión hidrostática es baja o despreciable.

La necesidad de una superficie continua, limpia y de alto coeficiente de adherencia, limitan en gran medida la utilización de la técnica (<http://portal.danosa.com/danosa>, 2006). Debido a las exigencias anteriores, se considera por el autor de esta tesis que la misma debe aplicarse sobre el revestimiento final donde se obtienen los mejores resultados.

Geomembranas y/o láminas impermeables son de las técnicas más utilizadas actualmente en las construcciones cuando se necesita lograr una impermeabilización o estanqueidad total; su aplicación se hace basada en las características y propiedades del flujo y el terreno con que interactuará.

Con la utilización de estas láminas se puede lograr un coeficiente de filtración que varía entre 10^{-13} a 10^{-14} m/s, lo que garantiza un alto grado de estanqueidad (López-Jimeno et al., 1997; Master_Builders_Technologies., 2004). Las empresas que producen estos productos facilitan las normas y procedimientos para la instalación de las láminas y geotextiles, Firmas como SiKa, Lika, Typar Geotextil, Donasa, Novanol entre otras, tienen sus normas y especificaciones sin embargo algunos investigadores proponen invariantes metodológicas para la utilización de las láminas y geotextiles (López-Jimeno et al., 1997).

En la actualidad existen novedosas láminas impermeables como las producidas por Bettor Mbt que sustituyen las ya conocidas PVC o láminas de polipropileno, éstas se construyen in situ y tienen entre sus ventajas que se evitan las juntas y el anclado (<http://concretonline.com>). Los elevados costos y la necesidad de un personal calificado para su aplicación, son las principales dificultades que presenta la utilización de esta técnica, considerada por muchos como revolucionadora. Por estas razones su aplicación se justifica además a partir del destino y plazo de servicio de la obra a tratar.

Las técnicas para la desviación de las aguas superficiales así como para el descenso forzado del manto acuífero no se describen porque en el trabajo no fueron consideradas para el control de las filtraciones.

A partir de investigaciones realizadas por el autor de este trabajo en túneles y minas subterráneas, y en la literatura especializada consultada, se ha identificado que los aspectos; pendiente del terreno, compactación; composición mineralógica, fallas y estratos, agrietamiento, porosidad, resistencia a compresión y tracción, densidad, masa volumétrica, lámina de infiltración, coeficiente de infiltración y filtración; profundidad de ubicación, forma y dimensiones, así como destino, vida útil, sostenimiento y fortificación de la excavación, al igual que el régimen de lluvia; presencia de ríos, arroyos y embalses en la zona de construcción, tienen incidencia en el comportamiento dinámico de las aguas subterráneas y en su control, cuando ésta afecta las excavaciones subterráneas.

Conclusiones.

1. Según lo expuesto anteriormente se puede afirmar que se cuenta con la tecnología necesaria para controlar las filtraciones de agua que afectan las excavaciones subterráneas en diferentes condiciones ingeniero geológicas y están identificados los aspectos que inciden en los procesos de filtración y de control del agua mostrados en el anexo I,1
2. No se cuenta con un procedimiento de elección de la técnica adecuada para el control de las filtraciones que afectan las excavaciones subterráneas, el que permitirá disminuir los costos por concepto de construcción y mantenimiento, además de hacer un uso racional de los túneles y otras obras subterráneas.

CAPÍTULO II

CAPÍTULO II: FACTORES QUE INCIDEN EN LOS PROCESOS DE CIRCULACIÓN DEL AGUA, SU CONTROL Y CRITERIOS PARA LA ELECCIÓN DE LA TÉCNICA CON ESE PROPÓSITO.

A partir del estudio del estado de la problemática relacionada con las afectaciones que ocurren en las excavaciones subterráneas que guardan relación con el agua, se identificaron y caracterizaron en el capítulo anterior algunos factores que inciden en los procesos de infiltración y filtración del agua; que a su vez influyen en su control, cuando afecta el proceso constructivo y destino de una excavación subterránea, los que constituyen el punto de partida para establecer un procedimiento que permita elegir la técnica adecuada para controlar el agua y con ello disminuir o evitar que se produzcan afectaciones al conjunto macizo excavación.

Para fundamentar los factores, conocidos por el autor, que inciden en los procesos de infiltración, filtración y control del agua que afecta una excavación subterránea que yace o se diseña en un macizo fuerte poco poroso y agrietado, fueron sometidos a consulta con varios expertos en la temática y se procesaron sus criterios.

II.1- Factores que influyen en el proceso de selección, sometidos al criterio de los expertos

Grupo de factores sometidos a criterios.

I. Determinación de las características naturales y antrópicas de la superficie.

Naturales Vegetación. Consolidación. Pendiente.	Antrópicos Industriales. Urbanísticos.
--	--

II. Características del macizo rocoso.

Características Litología. Composición mineralógica. Plegamiento. Estratificación. Fallas. Características del agrietamiento. Porosidad.	Propiedades del macizo Propiedades de resistencia.
---	---

III. Características sísmicas.

IV. Parámetros y características hidrográficas.

Régimen de lluvia.
 Presencia de ríos y arroyos.
 Presencia de embalses.

V. Régimen hidrogeológico.

Régimen saturado	Régimen no saturado
Lámina de infiltración.	Coefficiente de filtración.
Coefficiente de filtración.	Caudal de flujo.
Caudal del flujo de filtración.	

VI. Características de la excavación.

Profundidad de ubicación.
 Forma y dimensiones
 Destino y vida útil
 Método de arranque.
 Tipo de sostenimiento y/o
 fortificación

Para el procesamiento de criterios existen varios métodos, de ellos seleccionamos y aplicamos el método Delphi considerando que el mismo permite determinar el número de expertos en dependencia del error estimado, el nivel de precisión y confianza deseada, además de admitir y elegir los expertos en función de su nivel y competitividad.

Para seleccionar candidatos y elegir los expertos se tuvieron en cuenta la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) de Holguín, Centro de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Holguín, Universidad de Oriente e Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, además de tres especialistas españoles de las Universidades de Oviedo y Salamanca .

II.2– Método Delphi.

Para la aplicación del método se siguieron los siguientes pasos

1. Elaboración del cuestionario
2. Determinación del número de expertos
3. Selección de los expertos.
4. Realización de las rondas para obtener el consenso de los expertos.
5. Evaluación de los resultados a partir de la prueba de Hipótesis.

1-Elaboración del cuestionario.

El cuestionario se elaboró partiendo de los aspectos que tienen influencia en los procesos de filtración e infiltración de agua y en su control, cuando ésta afecta una excavación subterránea proyectada, en explotación o construida en un macizo rocoso fuerte poco poroso y agrietado, (anexo II.1)

2 Determinación del número de expertos

La determinación del número de expertos se realizó empleando el método probabilístico tomado de (Legra & Silva, 2007), como resultado se obtuvo la necesidad de **11 expertos**.

3- Selección de los expertos.

A partir de la competitividad se seleccionaron 15 especialistas de entre 18 candidatos encuestados, la evaluación de la competitividad de los 15 expertos, se recoge en los anexos II.2 y II.3a.

Como resultado se obtuvo lo siguiente

Expertos con un alto nivel de competitividad: 66,6%

Expertos con un nivel medio de competitividad: 33,3 %

Por tal razón se seleccionaron 12 expertos con un coeficiente de competitividad $K_c \geq 0,72$.

En el anexo II.3b se resumen otras características importantes de los expertos seleccionados.

4- Rondas de Delphi

Las encuestas confeccionadas son enviadas a los expertos para obtener criterios cualitativos en una primera ronda y cuantitativos en las rondas dos y tres, lo que permite obtener una unidad de criterios acerca de los aspectos que mayor incidencia tienen en los procesos analizados.

Primera ronda para obtener un consenso de criterios

En esta ronda se somete al criterio de los expertos el cuestionario elaborado (anexo II.1), al que se añadió a sugerencia de varios expertos, la lámina de infiltración, aspecto que se incluye dentro del macizo no saturado

Finalmente se propusieron 28 criterios con influencia en el proceso de filtración e infiltración de agua en el macizo rocoso, obteniendo que en 6 de ellos coincidieron 5 o menos expertos, en 14 criterios ligaron 10 o más expertos (ver anexo II.4).

En cuanto a los aspectos que influyen en la selección de la técnica para controlar el agua que afecta una obra subterránea, en 5 criterios ligaron menos de 5 expertos, mientras que en 10 coincidieron 12 o más expertos.

De esta manera para la segunda ronda se seleccionan 22 criterios para evaluar su influencia en el proceso de filtración, y 23 en el proceso de control. Ver anexos II.5(a y b).

Segunda Ronda para obtener el grado de influencia de cada criterio.

A la segunda ronda se sometieron 20 criterios relacionados con la filtración y 21 con el control del agua, lo que se debe a la introducción a la encuesta de los criterios de comprobación caudal de infiltración y caudal de filtración.

En esta ronda cada experto otorgará un valor entre 1 y 5 a cada criterio de acuerdo al grado de influencia; el procesamiento de esta información aparece en el anexo II.5(a y b).

Se tomaron los criterios que obtuvieron una frecuencia superior a 0,4.

Del procesamiento de las encuestas se obtuvo que:

- a. Para los aspectos que influyen en el proceso de filtración e infiltración de agua, sólo 16 obtuvieron una frecuencia superior al 0,40, los cuales fueron sometidos a la tercera ronda (anexo II.5 a).
- b. Para los aspectos que influyen en el proceso de control de las filtraciones, se obtuvo que sólo 17 criterios obtuvieron frecuencia superior a 0,40 (anexo II.5 b).

Los criterios seleccionados por los expertos, coinciden con los aspectos previamente considerados por el autor para caracterizar los procesos de filtración y control del agua que afecta una excavación subterránea.

Tercera ronda:

Se someten 16 criterios a los 12 expertos, los que se ordenaron desde 1 (mayor influencia) a 16 (menor influencia), (anexos II.6 a y b).

Con las evaluaciones realizadas por cada experto, se determina el grado de concordancia de los expertos a través del coeficiente de Kendall (Ken) cuyo valor oscila entre 0 y 1; se considera que cuando $Ken > 0,7$ existe elevada concordancia entre los expertos, y cuando $Ken < 0,4$ no existe concordancia.

$$Ken = \frac{12 \cdot \sum_{i=1}^P (Si - Smed)^2}{M^3 \cdot (P^3 - P)} \quad (10)$$

Donde: P) número de criterios que se valoran

M) cantidad de expertos encuestados

Si) suma de los valores asignados por los expertos a cada criterio i

Smed) es el valor medio de (Si) con respecto al número de criterio P

Del procesamiento de las encuestas se obtuvieron los siguientes valores del coeficiente de Kendall: para el proceso de filtración e infiltración $Ken = 0,6739$ confirmando la existencia de concordancia entre los expertos, y para el proceso de control de las filtraciones de agua $Ken = 0,916093$ lo que confirma la existencia de concordancia entre los expertos.

5- Prueba de Hipótesis.

Con la prueba de hipótesis se conoce si existe comunidad de intereses entre los expertos:

Hipótesis Nula: H_0 : No hay comunidad de intereses entre los expertos con relación a los criterios.

Hipótesis Alternativa: H_1 : Los expertos están de acuerdo con los criterios o sea, hay comunidad de intereses.

Seguidamente se calculan los valores:

$$\chi^2_{\text{calculada}} = M (P - 1) Ken \quad (11)$$

χ^2_{tabulada} (Nivel de significación; Grados de Libertad)

Si $\chi^2_{\text{calculada}} < \chi^2_{\text{tabulada}}$ entonces se acepta H_0 (**Hipótesis Nula**), lo que implica que no existe comunidad de intereses entre los expertos.

A partir del procesamiento semi automatizado de las encuestas se obtuvo que la **Hipótesis Nula** no se cumple:

Proceso de filtración.

Valor de $\chi^2_{\text{calculada}} = 121,30$

Valor de $\chi^2_{\text{tabulada}(0,1;15)} = 22,31$

Proceso de control de las filtraciones.

Valor de $\chi^2_{\text{calculada}} = 175,89$

Valor de $\chi^2_{\text{tabulada}(0,1;15)} = 23,54$

Para ambos procesos se cumple que $\chi^2_{\text{calculada}} > \chi^2_{\text{tabulada}(0,1;15)}$, incumpléndose la **Hipótesis Nula**, lo que significa que sí existe comunidad de intereses entre los expertos. Con esta ronda se obtuvieron los aspectos que mayor incidencia tienen en los procesos, expresados numéricamente a través de la frecuencia de la puntuación dada a cada criterio, (anexos II.6 a y b).

Al comparar los resultados del análisis por el criterio de expertos, se constata que existe coincidencia entre los aspectos tratados anteriormente que inciden en la filtración, los que al combinarse producen serias afectaciones en las excavaciones subterráneas, (inundaciones, pérdidas de estabilidad, disminución de las propiedades de resistencia del macizo rocoso, entre otras).

Conocidos los factores que mayor incidencia tienen en los procesos de infiltración, filtración y control del agua que afecta una excavación, es posible elaborar un procedimiento para seleccionar las variantes que más se adecuen a determinadas condiciones minero-técnicas. Sin embargo, debido a los diferentes destinos, y plazos de servicio que tienen las excavaciones subterráneas, se hace necesario elaborar un sistema de criterios para elegir la más racional entre varias posibles a utilizar.

II.3- Criterios para elegir la variante que más se adecua

En el proceso de elección de la técnica más racional para el control del agua que afecta las excavaciones subterráneas, se debe considerar un grupo de criterios sobre la base de lograr óptimos resultados en cuanto a costo y efectividad.

Criterios técnicos

- a) Grado de impermeabilidad que requiere la obra según su destino.

Este criterio contribuye a seleccionar la técnica cuyo coeficiente de permeabilidad resultante sea el más próximo al requerido por la excavación según el destino, para lo cual se le asignará una menor puntuación a la técnica cuyo coeficiente de permeabilidad residual sea menor que el requerido por la excavación, y una puntuación mayor, a la técnica cuyo coeficiente de permeabilidad residual sea el más cercano al establecido en el proyecto.

Criterios tecnológicos organizativos.

- a) Disponibilidad de la técnica e insumos.

Con este criterio y a partir del conocimiento de los especialistas se seleccionará la técnica que mayor disponibilidad en existencia e insumos tenga el país, se le asignará una mayor puntuación a la que tenga una mayor disponibilidad, y un menor valor a la que mayores dificultades ofrezca para acceder a ella.

- b) Nivel de especialización requerido y personal necesario.

Debido a que no siempre se cuenta con los especialistas necesarios para la aplicación de una técnica para controlar el agua se utiliza este criterio, asignando una puntuación en proporción inversa al grado de especialización que requiera la técnica.

- c) Durabilidad de la técnica.

Este criterio contribuye a que exista concordancia entre el plazo de servicio de la excavación subterránea y la durabilidad de la técnica, para lo que se le asignará un menor valor a la técnica cuya durabilidad sea mucho menor al plazo de servicio de la excavación y un mayor valor cuando exista correspondencia con el plazo de servicio de la obra afectada.

Criterios económicos

- a) Costo de la técnica e insumos.

Este criterio contribuye a elegir la técnica menos costosa, al asignar una puntuación en proporción inversa a su costo

- b) Productividad de la técnica.

Este criterio contribuye a elegir la técnica más productiva, al asignar una puntuación en proporción directa a su productividad.

Criterios ambientales.

- a) Efectos sobre la flora y fauna.

Este criterio contribuye a elegir la técnica cuyo daño a la flora y la fauna sea menor, para lo que se asignará una puntuación en proporción inversa a sus efectos negativos sobre estos componentes ambientales.

- b) Efectos sobre las aguas subterráneas.

Este criterio contribuye a elegir la técnica cuyo daño a las aguas subterráneas sea menor, para lo que se asignará una puntuación en proporción inversa a la que mayores efectos negativos cause.

- c) Efectos sobre las aguas superficiales.

Este criterio contribuye a elegir la técnica cuyo daño a las aguas superficiales sea menor, para lo que se asignará una puntuación inversamente proporcional a sus efectos negativos sobre éstas

- d) Efectos sobre el macizo.

Este criterio contribuye a elegir la técnica cuya afectación al macizo rocoso sea menor, para lo que se asignará una puntuación inversamente proporcional a la que mayores efectos negativos cause al macizo rocoso.

Conclusiones:

1. Se identificaron como los factores que condicionan los procesos de filtración, infiltración y control del agua:

La pendiente de la superficie, tipo de litología, composición mineralógica, presencia de fallas, características del agrietamiento, porosidad, propiedades físicas y mecánicas de las rocas; características sísmicas del área; régimen de lluvia, presencia de ríos, arroyos y embalses, lámina de infiltración, coeficiente de filtración; profundidad de ubicación, forma y dimensiones, destino y vida útil de la excavación, así como el tipo de sostenimiento y fortificación, que constituyen la base para elaborar y establecer el procedimiento de selección de las técnicas más adecuadas para controlar el agua y evitar las afectaciones que ésta produce en cualquiera de las etapas de un proyecto de construcción de excavaciones subterráneas.

2. Los criterios técnicos, tecnológicos, organizativos y ambientales, unidos a un proceso previo de selección de variantes para controlar el agua que puede afectar una excavación subterránea, permitirá la elección de la variante más racional.

CAPÍTULO III

CAPÍTULO III: PROCEDIMIENTO PARA ELEGIR LA TÉCNICA ADECUADA PARA EL CONTROL DE LAS FILTRACIONES DE AGUA QUE AFECTAN EL TÚNEL.

Para identificar áreas que requieren tratamiento para controlar las filtraciones en una excavación subterránea, se debe realizar un estudio integral de los principales aspectos que inciden en los procesos de circulación de agua y su control en toda la traza de la obra y zona de influencia. Con el propósito de racionalizar el estudio, se realiza un análisis de la susceptibilidad de la excavación a inestabilidad, inundación y otros fenómenos relacionados con la presencia de agua, que constituye la primera etapa del procedimiento.

III.1- Estructura del procedimiento.

A partir de los aspectos que inciden en los procesos de filtración e infiltración y control del agua, determinados en el capítulo anterior, se estructura el procedimiento en cuatro etapas:

- A: - Delimitación de zonas susceptibles a determinados fenómenos relacionados con la presencia de agua en la traza de la excavación.
- B: - Caracterización de las zonas susceptibles a la presencia de agua en el área de influencia de la excavación subterránea.
- C: - Selección de las técnicas para controlar las filtraciones de agua que afectan la excavación subterránea.
- D: - Elección de la técnica o sistema más adecuado para controlar el agua.

III.2- Delimitación de zonas susceptibles a determinados fenómenos relacionados con la presencia de agua en la traza de la excavación

La identificación previa de áreas susceptibles a fenómenos relacionados con el agua como inestabilidad, inundación y otros fenómenos geólogo-estructurales, desde la etapa de proyecto de un túnel, debe facilitar la adopción de medidas preventivas para evitar las afectaciones que podrían producirse durante su construcción o explotación. A continuación se presentan los pasos a seguir durante el proceso de identificación de estas áreas:

- I. Características generales del área del proyecto.
- II. Procesamiento del modelo digital de elevaciones del área bajo la cual se diseña la obra.
- III. Reconocimiento de campo en el área del proyecto a fin de caracterizar las condiciones geomecánicas del macizo rocoso que favorezcan los procesos de infiltración y filtración de agua.
- IV. Elaboración del mapa tectónico del área del proyecto.
- V. Evaluación de los factores hidrográficos e hidrogeológicos que influyen en el proceso de filtración.
- VI. Determinación de las zonas susceptibles.
- VII. Identificación y demarcación de las áreas susceptibles a la presencia de agua. Creación de buffer's.

Para desarrollar esta etapa de identificación de las zonas susceptibles a la acción conjunta del agua y determinados fenómenos geólogo-estructurales, tales como fallas, estratos, contactos litológicos, se deben cumplimentar las siguientes tareas:

Características generales del área del proyecto: características orográficas, hidrográficas, hidrogeológicas y tectónicas del área. Se describen los principales aspectos relacionados con rasgos morfológicos del relieve como las elevaciones, presencia de vaguadas, ríos.

Procesamiento y elaboración del modelo digital de elevaciones (MDE) del área bajo la que se diseña la excavación subterránea. Para esta tarea se realiza un levantamiento topográfico del área de influencia del terreno bajo el cual yace la obra a una escala no menor de 1:1000, y debe abarcar no menos de 200 metros a ambos lados del eje de la excavación. Esto se realiza con el fin de determinar rasgos morfológicos alineados en el terreno que denoten la presencia de discontinuidades en el macizo rocoso. Con las mediciones del levantamiento se elabora una base de datos para la creación del MDE. Este proceso también se puede realizar mediante la digitalización de planos del área objeto de estudio.

A partir de la rejilla creada con los datos del levantamiento o la digitalización realizada y utilizando el método simplificado propuesto por Moore et al. (1993) para determinar la pendiente entre puntos, se elabora el mapa correspondiente, este proceso se facilita con la ayuda de software que utilizan este algoritmo de modelación (Surfer, Autocad, Tierra etc).

A partir de la pendiente en cada nodo o punto de medición se determina el gradiente entre puntos con la aplicación de la primera derivada direccional (Schwartz, 1974) con lo que se obtiene un vector dirección que está en correspondencia con las direcciones preferenciales del movimiento de las aguas superficiales, y se identifican además los sitios de divergencia y acumulación de flujos. Para facilitar el trabajo se pueden utilizar los módulos *Terrain Slope* y *Map Vector*, del software Surfer, (versión 7.0 u 8.0).

Reconocimiento de campo en el área del proyecto. Se realiza con el fin de caracterizar las condiciones geomecánicas del macizo rocoso y determinadas estructuras geológicas que incidan en el comportamiento del agua subterránea, para ello se medirán elementos de yacencia de discontinuidades presentes en afloramientos del macizo rocoso, estratificaciones, agrietamiento, planos de fallas, empleando herramientas propias de estudios geotécnicos como: brújulas, inclinómetros y cintas métricas; también es posible utilizar datos de perforaciones geológicas realizadas, o estudios geofísicos.

Elaboración del mapa tectónico del área del proyecto. A partir del reconocimiento de campo o la digitalización de la información existente, se crean dos bases de datos, la primera con la ubicación geográfica de las mezo-estructuras geológicas, estratos y fallas, y sus elementos de yacencia, la segunda base con los elementos de yacencia y la ubicación de las mediciones realizadas en las principales familias de grietas. Estas mediciones deben abarcar el área de influencia de la construcción. El procesamiento se realiza mediante la representación estereográfica de las mediciones y el procesamiento estadístico de las mismas. Para facilitar la tarea se puede utilizar algún software (Dip, Grapher).

Evaluación de las características hidrogeológicas. Esta se realizará a partir de los datos tomados del estudio hidrogeológico: permeabilidad, dirección de las escorrentías superficiales, presión hidrostática y/o nivel del acuífero, con lo que se elaboran capas para un mapa hidrogeológico de la zona de influencia del túnel donde se identificarán áreas de alta permeabilidad, de alineación o acumulación de flujos, entre otros. Este proceso se puede realizar manualmente o con el empleo de algún software especializado (Surfer o Autocad).

Determinación de las zonas susceptibles: la identificación de las zonas susceptibles en el eje del túnel y zona de influencia, se basa en el **método Heurístico o Geomorfológico**, donde a partir de la identificación de variables condicionantes en los procesos, se realiza un análisis matricial de cada grupo clasificado en clases como se muestra a continuación, (tabla, 1, 2, 3 y 4).

Tabla 1 Características de la superficie (inclinación). (Matriz Aspecto A)

Clase	Descripción	Susceptibilidad
I	Zonas de acumulación de aguas	1
II	Zonas de pendientes (i) entre 0 y 3%	0,6
III	Zonas de pendientes (i) entre 3 y 5%	0,3
IV	Zonas con pendiente (i) > 5%	0

Tabla 2 Características de la permeabilidad (k m/día) (Matriz Aspecto B)

Clase	Descripción	Susceptibilidad
I	Rocas muy fuertes permeables $k > 100$	1
II	Rocas fuertemente permeables $k 10-100$	0,75
III	Rocas permeables agrietadas, $k 1-10$	0,50
IV	Rocas poco permeables, $k 0,1-1$	0,25
V	Rocas prácticamente impermeables, $k 0,01-0,1$	0

Tabla 3 Características de las zonas de falla. (Matriz Aspecto A1)

Clase	Descripción	Susceptibilidad
I	Zonas trituradas (milonitas), espaciamento < 20 mm	1
II	Zonas de muy agrietadas a agrietamiento medio), espaciamento (20 y 200 mm)	0,6
III	Zonas poco agrietadas, espaciamento (200 y 500 mm)	0,3
IV	Zonas agrietadas, espaciamento > 500 mm	0

Tabla 4 Características del agrietamiento. (Matriz Aspecto B1)

Clase	Descripción	Susceptibilidad
I	Zonas trituradas, espaciamento < 20 mm	1
II	Zonas muy agrietadas, espaciamento 20 y 100 mm	0,75
III	Zonas de agrietamiento medio, espaciamento (100 y 200 mm)	0,50
IV	Zonas poco agrietadas. espaciamento 200 y 500 mm	0,25
V	Zonas muy poco agrietadas, espaciamento > 500 mm	0

Para la aplicación del método **Heurístico** primeramente se realiza la combinación de las matrices ($A = [a_{ij}]$; $B = [b_{ji}]$) y ($A1 = [a_{ij}]$; $B1 = [b_{ji}]$) con lo que se obtienen las matrices que caracterizan los factores $C = (A+B)/2$ y $C1 = (A1+B1)/2$, luego al combinar C y $C1$, se obtiene la matriz resultante, $S_v = (C+C1)/2$ que expresa los valores de susceptibilidad (Tabla 5).

Tabla 5 Matriz resultante (S_v)

		Matriz de combinación o matriz S_v (agrietamiento y presencia de fallas)				
Matriz combinación (pendiente permeabilidad)	de	1	0,875	0,75	0,625	0,5
	0,8		0,675	0,55	0,425	0,3
	0,65		0,525	0,4	0,275	0,15
	0,5		0,375	0,25	0,125	0

Para elaborar la escala de susceptibilidad se considera la incidencia de los factores representados en las tablas 1-4 y sintetizados en la tabla 5; los colores o tramas a utilizar son definidos por el usuario, el significado de cada color o puntuación aparece sintetizado en el anexo III.1.

Superposición de mapas: en el caso del método Heurístico la superposición de los mapas temáticos se realiza a partir de la combinación de los principales factores condicionantes de susceptibilidad del túnel a fenómenos relacionados con la presencia de agua como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Orden en que se superponen los factores condicionantes de la susceptibilidad

<ol style="list-style-type: none"> 1. Mapa de las características de la superficie del terreno. <ul style="list-style-type: none"> - Modelo Digital del Relieve (3D) - Pendiente del terreno. 2. Principales estructuras geológicas. 3. Coeficiente de permeabilidad. 4. Cota del nivel del acuífero. 5. Eje del túnel. 	<p>Nota: Siempre que sea posible se presentará una vista en planta y de perfil en 3D.</p> <p>Nota: Cuando existan rocas estratificadas se presentará un perfil del eje del túnel.</p>
---	---

La representación de los valores S_v permitirá delimitar las zonas y el grado de susceptibilidad en cada punto de medición.

Determinación de las zonas susceptibles por el método geomorfológico; para determinar las zonas susceptibles en el eje del túnel y zona de influencia, se parte de los factores condicionantes principales o pasivos, permeabilidad y agrietamiento, y el establecimiento de las clases, el valor de la susceptibilidad S_v se obtiene al combinar las matrices B y $B1$, teniendo como resultado la matriz (S_v), ($S_v = (B+B1)/2$).

Superposición de mapas: La superposición de los mapas temáticos que contienen los principales factores condicionantes de susceptibilidad a fenómenos relacionados con la presencia de agua en el túnel, se realiza como se muestra en la tabla 7:

Tabla 7. Orden en que se superponen los factores condicionantes de la susceptibilidad para el método geomorfológico

Factores pasivos	
Principales estructuras geológicas (fallas y grietas). Coeficiente de permeabilidad. Eje del túnel.	Nota: Cuando existan rocas estratificadas se presentará un perfil del eje del túnel.
Factores dinámicos activos:	
Mapa de las características de la superficie del terreno. -Modelo digital del elevación (3D) -Pendiente del terreno. Cota del nivel del acuífero.	Nota1: Siempre que sea posible se presentará una vista en planta y una vista de perfil en 3D.

Los factores pasivos representan la posibilidad de ocurrencia de los fenómenos en los lugares identificados y en ocasiones pueden ser suficientes para el tratamiento, pero los factores dinámicos contribuyen a confirmar la existencia de zonas susceptibles. Nota. *La confirmación de un terreno de muy alta permeabilidad, no significa que realmente fluya agua, se necesita que la excavación esté en contacto con el nivel del acuífero ya sea permanente o temporalmente.*

La escala de susceptibilidad se elaboró considerando la incidencia de los factores representados en las tablas 1, 2, 3 y 4 y sintetizados en la tabla 5 y la escala es válida para ambos métodos.

Escala de susceptibilidad

	Escala	Denominación
	$S_v \geq 0,75$	Zona muy susceptible
	$0,5 \leq S_v < 0,75$	Zona de susceptibilidad media
	$0,15 < S_v < 0,5$	Zona de poca susceptibilidad
	$S_v \leq 0,15$	Zona de muy poca susceptibilidad

Demarcación de las zonas susceptibles y/o creación de buffers: Para delimitar las zonas susceptibles se realiza en cada punto de documentación la misma operación efectuada entre las matrices. El valor S_v obtenido para cada punto, se representa en un mapa. Posteriormente, se trazan isolíneas atendiendo a los valores definidos en la escala de susceptibilidad. Este proceso puede realizarse de forma manual, o automatizada con la ayuda de software especializado como Surfer, ArcView, ArcGIS, TeleMap etc.

III.3- Caracterización de las zonas susceptibles a las presencia de agua en el área de influencia de la excavación subterránea.

Se realiza una caracterización más detallada de las zonas de la excavación consideradas como susceptibles a las afectaciones producidas por las filtraciones de agua.

- | | |
|--|--|
| 1)- Características naturales y antrópicas de la superficie del terreno. | 5)- Calidad del macizo rocoso. |
| 2)- Características del macizo rocoso. | 6)- Correlación entre la calidad del macizo y su coeficiente de permeabilidad. |
| 3)- Características hidrográficas. | 7)- Características de la excavación. |
| 4)- Características hidrogeológicas. | |

Características naturales y antrópicas de la superficie del terreno.

- | | |
|--------------------------|--|
| a) Orografía de la zona. | b) Consolidación de la superficie del terreno. |
|--------------------------|--|

Orografía de la zona. (Pendientes y depresiones)

Se toman las características correspondientes a la orografía y topografía de la superficie, determinadas en la etapa anterior y expresada a través del MDR.

Consolidación.

Para su determinación se utiliza uno de los métodos siguientes:

- | | |
|-----------------------------------|------------------------------|
| 1. Métodos geofísicos (Georradar) | 3. Método del cono estático. |
| 2. Método del penetrómetro. | |

Características del macizo rocoso.

- | | |
|---------------------------------------|--|
| a) Calidad del macizo. | d) Litología y composición mineralógica. |
| b) Características del agrietamiento. | e) Porosidad. |
| c) Características geoestructurales. | f) Propiedades físico-mecánicas. |

Características geoestructurales del área. (Estratificación, plegamientos y fallas).

Los elementos de yacencia de estos fenómenos geoestructurales se determinan mediante el análisis de las perforaciones geológicas, o mediante el empleo de métodos geofísicos. Los resultados deberán ser plasmados en hojas cartográficas, planos digitales o paquetes de planos superpuestos a una escala no mayor de 1:1000.

Propiedades físico-mecánicas.

- a) Resistencia a compresión mono axial. b) Coeficiente de reblandecimiento.

Se determina en muestras regulares cilíndricas de 40-45mm de diámetro y una altura no mayor de 1,5 su diámetro, o con muestras semi regulares cuyas tres dimensiones perpendiculares no se diferencien en más de 1,5 veces; para muestras regulares se utiliza la expresión siguiente:

$$\sigma_c = \frac{Pr}{S} \quad (11)$$

para muestras semi-regulares se utiliza la siguiente expresión:

$$\sigma_c = Pr \left(\frac{\gamma_v}{g} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (12)$$

Donde: Pr) esfuerzo de ruptura; (kgf)

 S) área de la superficie de la muestra en contacto con la prensa; (mm)

 g) Masa volumétrica de la roca. kg/m³

Coeficiente de reblandecimiento.

Se determina en muestras que deben cumplir los requisitos establecidos para los ensayos a compresión, aplicando la expresión siguiente.

$$K_r = \frac{\sigma_c^s}{\sigma_c^n} \leq 1 \quad (13)$$

Donde:

σ_c^n) Resistencia de la roca con su humedad natural. σ_c^s) Resistencia de la roca saturada.

Características del agrietamiento.

Se determinan los parámetros siguientes:

1. Numero de familias de grietas.

En cada familia se determina:

- a. Acimut de buzamiento. b. Tipo de relleno.
c. Buzamiento. d. Persistencia.

Calidad del macizo.

Se determina a través del índice RQD propuesto por DEERE obtenido de la recuperación de testigos de perforación, o mediante la relación de este parámetro con el índice Jv (conteo volumétrico) propuesto por Palmström.(Palmström, 2005)

Características hidrográficas.

- | | |
|--------------------------------|---|
| a. Régimen de lluvia. | c. Presencia de ríos, arroyos y embalses. |
| b. Escorrentías superficiales. | d. Máximas avenidas. |

Régimen de lluvia.

A partir de los registros publicados por la Dirección de Cuencas Hidrográficas del Servicio Hidrológico Nacional se determinan los máximos registros de lluvia por meses sucedidas en los últimos 10 años.

Escorrentías superficiales.(San-Ramán, 2006)

Partiendo del mapa de pendiente elaborado en la *etapa A*, se identifican las zonas de acumulación de agua y de máxima velocidad de las escorrentías. En los casos que sea necesario, se determina la magnitud del escurrimiento superficial, utilizando el método Racional mediante la expresión siguiente, (San-Ramán, 2006):

$$Q=C \times I \times A \quad (15)$$

Donde:	Q)- caudal de escorrentía m ³ /s	I)- intensidad de la precipitación mm/hora.
	C)- coeficiente de escorrentía	A)- superficie de la cuenca m ²

Presencia de ríos, arroyos y embalses.

En el mapa del área de construcción se señalan las zonas de influencia de los arroyos, ríos y embalses.

Máximas avenidas.

A partir de los registros publicados por la Dirección de Cuencas Hidrográficas del Servicio Hidrológico Nacional se determinan las máximas avenidas registradas y su frecuencia en los últimos 50 años.

Características hidrogeológicas.

- | | |
|-------------------------------|---|
| a) Lámina de infiltración. | c) Caudal de infiltración. |
| b) Coeficiente de filtración. | d) Profundidad de ubicación del manto acuífero. |

Lámina de infiltración.

En los casos que sea necesario este parámetro, se puede determinar utilizando el método empírico propuesto por el Servicio de conservación de suelos de los EUA. (SCSS). (Suárez_Díaz, 1998; Infante et al., 2007).

Coeficiente de filtración.

Se determina utilizando las siguientes técnicas:

Técnica experimental. (ensayo de Lugeon o inyección a presión con doble obturación).

Método analítico.

Ecuación propuesta por (Bear et al., 1993).

$$k = \frac{b^3}{12S} \quad (16)$$

Donde: S: espaciamiento entre grietas; mm. b: abertura de las grietas o juntas; mm.

Caudal de infiltración.

Para macizos saturados con recarga radial. Se determina mediante el método propuesto por Heuer en 1995, tomado de (López-Jimeno et al., 1997; Anónimo, 2004)

Para macizos no saturados con recarga vertical, se determina mediante el método propuesto por Heuer en 1995, o se aplica la ley de Darcy. $Q = K * W$

Donde:

W: el área bajo la cual yace el túnel $W=B \times H$

K: coeficiente de permeabilidad

En la figura 6 se ejemplifican los parámetros a considerar.

Donde: B) diámetro de influencia del túnel.

b) ancho del túnel.

R) radio de influencia del túnel

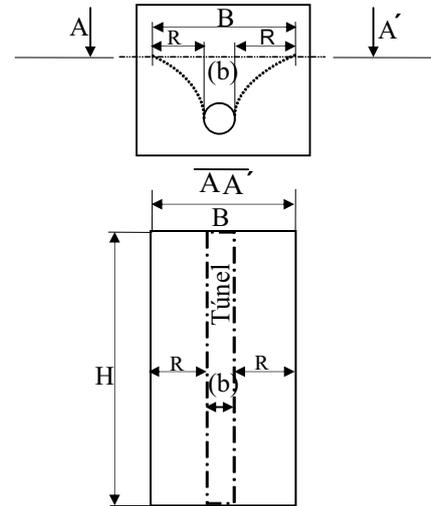


Figura 6 Parámetros a considerar para determinar el caudal que se infiltra

Profundidad de ubicación del manto acuífero.

Se determina a partir de las perforaciones realizadas durante las investigaciones geológicas.

En los casos que sea necesario densificar la red de datos, se pueden utilizar otros métodos más económicos como son los geofísicos (método del georadar).

Correlación entre la calidad del macizo y permeabilidad.

Se conoce de la correlación entre la calidad de los macizos rocosos fuertes agrietados y poco porosos y su permeabilidad, lo que se recoge en trabajos publicados por Pfeifle, İşcan y Cuesta entre otros, (Pfeifle et al., 1998; İşcan et al., 2006; Cuesta et al., 2008).

En trabajos realizados por el autor de esta tesis en rocas fuertes, principalmente básicas y ultra-básicas (serpentinitas, gabros y diabasas), se obtuvieron las funciones que describen el comportamiento de ambos parámetros, se determinaron por el Método de los Mínimos Cuadrados ajustando el Modelo de Weibull mediante el software Tierra,

$$y = a - b e^{-c x^d} \quad (17)$$

Donde: y)- calidad del macizo

x)- permeabilidad

a, b, c, d)- coeficientes de ajuste obtenidos con el software Tierra.

A partir de estas características del macizo rocoso y su correlación, se establecieron las 5 categorías para los macizos afectados por el agua, ($K\omega$). A la clase $K\omega$ I pertenecen las

rocas más sanas y de baja permeabilidad ($K < 0,1$ m/día), mientras que a la clase $K\omega$ V pertenecen las rocas más afectadas por los fenómenos estructurales y poseen una permeabilidad muy alta (más de 100 m/días) tabla 8.

Tabla 8. Relación entre el coeficiente de permeabilidad del macizo y el índice de calidad propuesto por Deere (RQD), expresado a través de $K\omega$

Categorías ($K\omega$)	I	II	III	IV	V
Ke m/día	5 0,001-0,1	4 0,1 – 1,0	3 1-10	2 11-100	1 más de 100
Deere	E 90 < RQD < 100	D 75 < RQD < 90	C 50 < RQD < 75	B 25 < RQD < 50	A 0 < RQD < 25

Características de la excavación.

- a. Profundidad de ubicación de la excavación.
- b. Forma y dimensiones de la excavación.
- c. Destino y plazo de servicio.
- d. Método de excavación.
- e. Tipo de sostenimiento y/o fortificación.

Estos datos se toman del proyecto de la excavación subterránea aprobado.

III.4-Selección de la técnica para el control de las filtraciones de agua a las excavaciones subterráneas.

Para la selección de las técnicas para el control de las filtraciones que afectan áreas en la traza de una excavación subterránea consideradas como zonas susceptibles o muy susceptibles, se elaboró un algoritmo que se basa principalmente en la correlación que existe entre la permeabilidad y calidad de los macizos rocosos fuertes poco porosos y agrietados y considera además los principales aspectos que inciden en el proceso de filtración de agua y su control, figura 7. El mismo está estructurado en 4 bloques y 19 pasos.

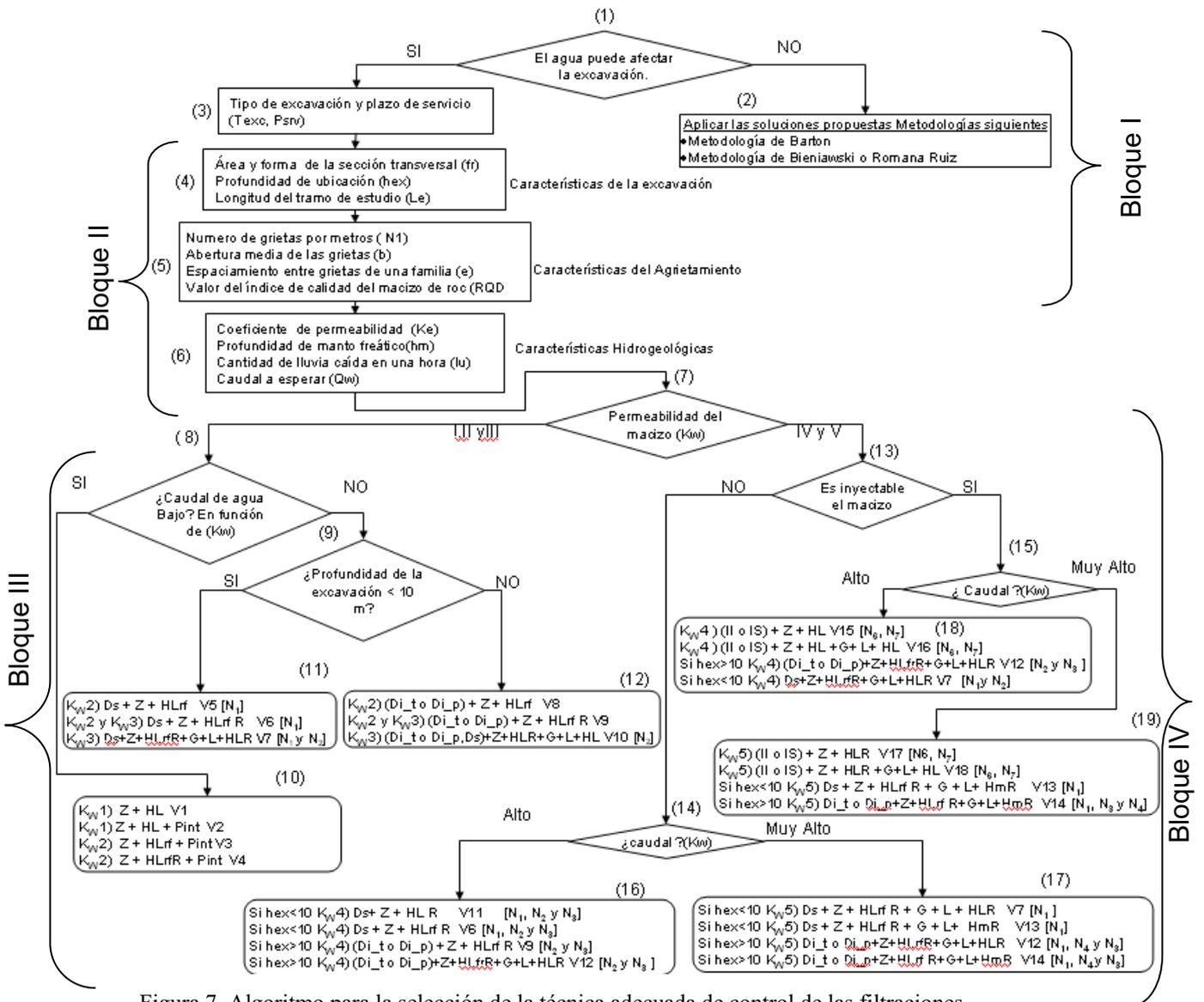


Figura 7. Algoritmo para la selección de la técnica adecuada de control de las filtraciones.

La nomenclatura empleada en el algoritmo para denominar las técnicas de control de las filtraciones y los parámetros a utilizar se describen en la tabla 9

Tabla 9 Denominación de las técnicas y parámetros utilizados en el algoritmo.

Técnicas a utilizar	
Nomenclatura	Denominación
Ds	Drenaje desde la superficie bajo la que yace la excavación.
Di_t	Drenaje desde el interior para uso temporal.
Di_p	Drenaje desde el interior para uso permanente.
G	Geotextiles.
hex	Profundidad de ubicación de la excavación respecto a la superficie.
HL	Hormigón lanzado ordinario.
HLR	Hormigón lanzado reforzado.
HLrf	Hormigón lanzado con aditivo de rápido fraguado.
HLrf R	Hormigón lanzado con aditivo de rápido fraguado y reforzado.
HmR	Hormigón monolítico reforzado.
II	Inyección desde el interior.
Is	Inyección desde la superficie.
Pint	Pintura impermeabilizadora.
V1	Variante.
N1	Notas o consideraciones de la variante a aplicar.
C1	Categoría según la permeabilidad y la calidad del macizo determinado a partir de la correlación entre ambos aspectos.
Notas (N _i)	
N ₁	Cuando se presenta una situación similar en excavaciones horizontales con salida directa a la superficie (socavones), resulta más racional drenar el manto desde el interior de la excavación, posibilidad que siempre se debe analizar.
N ₂	Si se cuenta con la técnica para aplicar hormigón in situ con paneles deslizantes se puede sustituir el hormigón lanzado reforzado, con lo que se disminuye la productividad pero se aumenta la densidad del hormigón, se humaniza el trabajo, y aumenta la calidad de la terminación.
N ₃	La utilización del drenaje desde la superficie debe ser temporal, no se excluye la posibilidad del empleo del drenaje desde el interior de la excavación siempre que no afecta la calidad del trabajo. Con la utilización del drenaje desde el interior, la afectación al medio ambiente es menor.
N ₄	Analizar la posibilidad de implementar el método Oberhasli o similar.
N ₆	Las inyecciones que se realizan con el doble propósito deben ser comprobadas.
N ₇	Después de realizar las inyecciones, se debe aplicar una capa de hormigón lanzado para proteger la superficie desnuda, evitar su deterioro, y disminuir la resistencia dinámica del interior de la excavación

Paso 1 (condicional).

Se analiza si la obra requiere o no tratamiento especial para el agua. Cuando en la excavación subterránea es necesario controlar las filtraciones de agua se desarrollan los **Bloques II, III y IV** del algoritmo, en caso contrario, se desarrolla el **Bloque I**.

Bloque I

Si el tipo de excavación y la forma de manifestarse el agua no requieren tratamiento especial, se desarrolla el **Paso 2**

Paso 2 (ejecución y resultados)

Se evalúa el conjunto macizo-excavación a través de las clasificaciones geomecánicas y como resultado se propone un tipo de sostenimiento o revestimiento adecuado, según las metodologías clásicas Barton y Bieniawski

Bloque II

En el bloque formado por los pasos 3, 4, 5 y 6, se caracteriza la obra afectada a través de la introducción y evaluación de los principales factores que inciden en los procesos de filtración y control del agua en la excavación subterránea.

Paso 3. Destino y plazo de vida de la excavación (entrada)

Se evalúa este aspecto debido a la lógica proporcionalidad que existe entre el destino y plazo de servicio con respecto a los costos y durabilidad de la técnica de control de las filtraciones.

La entrada se realiza seleccionando una de las tres categorías establecidas en la tabla 10.

Tabla 10) Clasificación de las excavaciones subterráneas en función del destino y plazo de servicio.

Categoría/Plazo	(I) / PI < 5 años	(II) / 5 < PI < 10 años	(III) / PI > 10 años o más
Tipo o destino de excavación	Galerías preparatorias y galerías de minas.	Excavaciones temporales, y para el acceso a cuerpo minero, o de otro tipo	Viaductos. Túneles hidráulicos y salas para máquinas. Obras para la defensa y estratégicas. Algunas excavaciones mineras destinadas como depósitos y almacenes.

Paso 4: Características de la excavación subterránea (entrada).

Este dato permite excluir técnicas de control y advertir sobre la efectividad de algunas en función de la forma y dimensiones de la sección transversal, la profundidad de ubicación y longitud de los tramos de estudio. Ejemplo: Cuando la forma de la sección transversal es rectangular no es recomendable utilizar hormigón lanzado, debido a su dificultad para adherirse en la unión del techo con las paredes, además de la alta concentración de tensiones que se produce en estos puntos.

Paso 5: Características del agrietamiento (entrada).

Se introducen valores cuantitativos que caracterizan el agrietamiento y algunos son necesarios para determinar la permeabilidad o el RQD, si éstos no se conocen; estos valores se utilizarán

en el séptimo paso. La permeabilidad se determina a partir del espaciamiento (e) y la abertura entre caras (b), según ecuación 16 propuesta por Bear y otros (1993).

El RQD se puede introducir directamente o inferirlo a partir del índice J_v propuesto por Palmström (1982, 2005) que depende del número de grietas en una familia (N_1) y una constante K_1 que considera la distribución lineal de las grietas en un metro.

Paso 6. Características hidrogeológicas (entrada)

Cuando la permeabilidad (K_e) por tramos o zonas es conocida se introduce en este paso, de no conocerse se puede inferir a partir de su correlación con la calidad del macizo (tabla 8). Se introducen además los valores del caudal (Q_w) que se filtra a la excavación subterránea y el nivel del acuífero (h_m); el valor del caudal se puede calcular conociendo la permeabilidad y las características de la excavación (**paso 4**).

Paso 7. Condición.

En este paso se selecciona la categoría (K_ω) según la calidad del macizo afectado por el agua (I, II, III o IV y V), donde se correlacionan permeabilidad y RQD, tal y como se muestra en la tabla 8. Esta correlación se obtiene utilizando el modelo de Weibull $y = a - b e^{-c x^d}$ (Cuesta et al., 2008).

Los tramos de excavación enmarcados en las categorías (I, II y III) se desarrollaran en el **bloque III** donde la permeabilidad es igual o inferior a 10 m/día. Los tramos donde la permeabilidad sea mayor de 10 m/día, serán tratados en el **bloque IV**, donde se desarrollan desde el **paso 13** hasta el **19**.

En ambos bloques (III y IV) se analiza si el caudal esperado es alto o bajo (pasos 8, 14 y 15) para su categoría, si la profundidad de ubicación de la excavación es superior a los 10 m (paso 9 y del 16 al 19). La inyectabilidad se evalúa en el bloque IV (paso 13), donde se tratan los macizos de calidad mala y muy mala (categorías K_ω IV y K_ω V).

En el **bloque III** las principales técnicas que se sugieren son el hormigón lanzado, el drenaje desde el interior y desde la superficie, y las láminas impermeables combinadas con geotextiles, mientras que en el **bloque IV**, debido a la calidad que tiene el macizo se propone la utilización de las inyecciones de sustancias cementantes con doble propósito: fortalecimiento y control del agua.

III.5- Elección de la técnica más adecuada para cada caso concreto.

Como resultado de la segunda etapa y aplicación del algoritmo se seleccionan dos o más variantes para controlar el agua, de ellas, sólo una será aplicada en cada tramo susceptible a la presencia de agua. La elección de la variante se basa en cuatro grupos de criterios, seleccionados a partir del método heurístico y considerando el juicio de los expertos encuestados sobre la influencia de un grupo de aspectos técnicos, tecnológicos, económicos y ambientales, sobre la temática.

Selección de los criterios:

Se evalúan los formularios procesados por los expertos para seleccionar los criterios considerados por éstos, y que ejercen influencia en el proceso de elección de la técnica para controlar el agua que afecta una excavación subterránea. La selección se realiza tomando en consideración la puntuación otorgada por los expertos a cada criterio (1 -5), excluyendo aquellos cuya puntuación fue inferior a 3 puntos.

Criterios seleccionados:

1. Criterios técnicos. (C1)

Grado de impermeabilidad que se logra con la técnica.

3. Criterios tecnológicos (C2)

Disponibilidad de la técnica e insumos. Ctg1

Nivel de especialización requerido Ctg2

Durabilidad de la técnica. Ctg3

2. Criterios económicos.(C3)

Costo de la técnica e insumos. Ce1

Productividad de la técnica. Ce2

3. Criterios ambientales.(C4)

Efectos sobre la flora y fauna. Ca1

Efectos sobre las aguas subterráneas. Ca2

Efectos sobre las aguas superficiales. Ca3

Efectos sobre el macizo. Ca4

La escala de evaluación de los criterios se toma a partir de reglas del método Delphi, y considerando que el número medio de criterios en los grupos antes mencionados es 2,5; se toma una escala variable entre 1 y 3, asignándole 3 a los criterios más favorables y 1 a los menos favorables para la aplicación racional de la técnica.

Grado de impermeabilidad que se logra con la técnica. C1

Expresa la correspondencia entre el grado de impermeabilidad que exige la excavación y el que se puede lograr con la aplicación de las técnicas en análisis, otorgándole 1 punto cuando el resultado que se puede lograr es inferior al requerido, y 3 puntos cuando el posible resultado que se logre con la técnica sea el más próximo al exigido según el destino de la excavación subterránea.

Disponibilidad de la técnica e insumos. Ctg1

Expresa la disponibilidad real de la técnica así como los materiales e insumos para su implementación; se le otorga 1 punto cuando no se disponga de la técnica, y sólo se accederá a ella si se adquiere en el exterior; 2 puntos cuando la empresa ejecutora no cuenta con la técnica y tiene que contratar a terceros; y 3 puntos cuando la empresa ejecutora cuenta con la técnica seleccionada.

Nivel de especialización requerido. Ctg2

Expresa la disponibilidad de especialistas para operar la técnica seleccionada por parte de la empresa ejecutora o el usuario, otorgándole: 1 punto cuando es necesario contratar a técnicos extranjeros o enviar a calificar al extranjero al personal necesario; 2 puntos cuando es necesario contratar a especialistas en el territorio nacional o son enviados a calificarse dentro del territorio nacional para operar la técnica seleccionada, y se le otorgará 3 puntos cuando la empresa contratada o el usuario cuenta con el personal especializado para operar la técnica seleccionada.

Durabilidad de la técnica. Ctg3

Expresa la correspondencia entre el plazo de servicio establecido para la excavación y el periodo de duración de la técnica seleccionada, otorgando 1 punto cuando el periodo de tiempo estimado de trabajo eficiente de la técnica es inferior al plazo de servicio de la excavación, 2 puntos cuando el periodo de vida útil de la técnica es muy superior al plazo de servicio de la excavación, y se le otorgará 3 puntos cuando el plazo de vida útil de la técnica se corresponda con el plazo de servicio de la excavación o esté muy próximo a éste, con lo que se disminuyen los costos por concepto de mantenimientos y reparaciones.

Con los criterios *costo de la técnica e insumos (Ce1)* y *productividad de la técnica. (Ce2)* se busca el equilibrio entre los aspectos que encierran los criterios, otorgándoles: 1 punto a la técnica seleccionada más costosa, y a la menos productiva y 3 puntos a la técnica más productiva, y a la menos costosa.

La evaluación de los criterios ambientales (*efectos sobre la flora y fauna. Ca1, efectos sobre las aguas subterráneas Ca2, efectos sobre las aguas superficiales. Ca3 y efectos sobre el macizo. Ca4*) se realizará asignándole 1 punto a la técnica que mayor efecto negativo ocasione sobre los elementos y características ambientales consideradas; y una puntuación de 3 puntos a la técnica seleccionada que menos efecto negativo ocasione.

En la tabla 11 se muestran los grupos de criterios y la puntuación asignada a cada uno a partir del efecto (más o menos favorable) de las técnicas seleccionadas. Para elegir la variante más adecuada primeramente se calcula la media ponderada de los valores asignados a cada variante, tomando como factor de ponderación el número de elementos en cada grupo de criterios (N_i).

$$\bar{C}_{el} = \frac{\sum N_i \times \bar{C}_i}{\sum N_i} \quad (18)$$

Donde:

\bar{C}_{el} criterio de elección;

(\bar{C}_i) media de los valores asignados a cada grupo de criterios en una variante;

(N_i) número de criterios evaluados en cada grupo.

Se elige como técnica más racional aquella que tenga el mayor valor de \bar{C}_{el} .

Tabla 11) Grupos de criterios a utilizar para elegir la técnica más adecuada. (valores asignados)

Criterios	Evaluación		
Criterios técnicos. ($\overline{C1}$)			
Grado de impermeabilidad que se logra con la técnica.	Inferior = 1	Superior = 2	adecuado= 3
Criterios tecnológicos ($\overline{C2}$)= (Ctg1+Ctg2+Ctg3)/3			
Disponibilidad de la técnica e insumos. Ctg1	Poca = 1	Media = 2	Alta = 3
Nivel de especialización requerido Ctg2	Alto = 1	Medio =2	Bajo = 3
Durabilidad de la técnica. Ctg3	Poca = 1	Media = 2	Alta = 3
Criterios económicos. ($\overline{C3}$)= (Ce1+Ce2)/2			
Costo de la técnica e insumos. Ce1	Alto = 1	Medio = 2	Bajo = 3
Productividad de la técnica. Ce2	Baja = 1	Media = 2	Alta = 3
Criterios ambientales. ($\overline{C4}$)= (Ca1+Ca2+Ca3+Ca4)/4			
Efectos sobre la flora y fauna. Ca1	Alto = 1	Medio =2	Bajo = 3
Efectos sobre las aguas subterráneas. Ca2	Alto = 1	Medio =2	Bajo = 3
Efectos sobre las aguas superficiales. Ca3	Alto = 1	Medio =2	Bajo = 3
Efectos sobre el macizo. Ca4	Alto = 1	Medio =2	Bajo = 3

Conclusiones

1. La adecuación de los métodos Heurístico y Geomorfológico para la evaluación de la susceptibilidad de las excavaciones subterráneas a ser afectadas por la presencia de agua contribuye a:
 - a. Evitar la realización de estudios en zonas donde existe poca probabilidad de ser afectadas por el agua, lo que tiene una repercusión económica.
 - b. Permite en aquellas zonas delimitadas como susceptibles a ser afectadas por la presencia de agua trabajar a una escala de detalle mayor.
2. El algoritmo y el programa confeccionados permiten, a partir de los principales aspectos que condicionan la circulación de agua por los macizos rocosos poco porosos y agrietados y la afectación del conjunto macizo excavación, seleccionar las variantes adecuadas para cada situación.
3. Los criterios utilizados, técnicos, tecnológicos organizativos, económicos y ambientales, contribuyen a la elección de la variante más racional.

CAPÍTULO IV

CAPÍTULO IV: APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PROPUESTO.

La aplicación del procedimiento para seleccionar la técnica de control del agua en una excavación subterránea susceptible a sus afectaciones en la etapa de proyecto, ejecución o explotación, permitirá comprobar su aplicabilidad y/o efectividad, y realizar los ajustes, de ser necesarios. Esta aplicación se puede llevar a cabo de tres maneras posibles:

- a) *Simulación* de la aplicación: utilizando datos elaborados para situaciones teóricas, **caso teórico**, se ejecuta el procedimiento y se proponen las variantes de técnicas para controlar las filtraciones de agua que afectan las excavaciones subterráneas.
- b) *Aplicación teórica*: utilizando datos reales de excavaciones subterráneas en etapas de proyecto, ejecución o explotación, se ejecuta el procedimiento, se eligen las variantes más adecuadas para cada situación, sin llegar a su aplicación. Los resultados se evalúan en función de la correspondencia entre las situaciones tratadas y las variantes elegidas en cada caso.
- c) *Aplicación real o validación*: utilizando datos reales de excavaciones subterráneas afectadas por las filtraciones de agua en cualquiera de sus etapas, se ejecuta el procedimiento y se eligen las variantes para el control de las filtraciones que más se adecuan a cada situación concreta y se evalúa la calidad de los resultados, a partir de la efectividad de su aplicación.

Para comprobar la aplicabilidad y efectividad del procedimiento se realizará una aplicación teórica del mismo ejecutando los pasos siguientes.

1. Elección y justificación de las excavaciones objeto de estudio.
2. Aplicación del procedimiento.
3. Análisis de los resultados.

De ser necesario, durante el proceso de evaluación de los resultados, se podrán realizar ajustes y correcciones al procedimiento.

IV.1- Elección y justificación de las obras a estudiar.

En las provincias orientales, como en todo el país, existen excavaciones subterráneas construidas, en ejecución o en etapa de proyecto. En muchos de estos proyectos para este tipo de construcción no ha sido tratado con suficiente profundidad el proceso de filtración de agua y las afectaciones derivadas de ellas; cuando esto sucede se producen afectaciones en el interior de las excavaciones, que pueden manifestarse a corto y largo plazo.

Con el propósito de integrar, desde la etapa de diseño de una excavación subterránea, la utilización de técnicas para controlar las filtraciones en zonas susceptibles a la presencia de agua, se elaboró un procedimiento. Para conocer su efectividad, es necesario aplicarlo en una obra afectada, por lo que se procedió a identificar las obras subterráneas que se construyen y explotan en el oriente del país, para luego realizar la selección de una o más obras que ofrezcan condiciones adecuadas para el estudio, las que deben ser representativas, en cuanto a importancia económica, características superficiales, geológicas e hidrogeológicas, geomecánicas y constructivas.

Existen proyectos y excavaciones subterráneas tales como: la mina de cromo Las Merceditas, el complejo de obras hidráulicas Tránsito Este-Oeste que se construye en Holguín, y el Tránsito Sabanalamar-Pozo Azul en Guantánamo, la red de túneles populares en el municipio Moa, en las que se pueden realizar las investigaciones.

Para la selección del proyecto subterráneo objeto de estudio, se tomaron en consideración los aspectos siguientes.

1. Proyecto o informe general de la obra.
2. Interés económico y/o poblacional.
3. Representatividad litológica.
4. Acceso a la obra
5. Incidencia negativa del agua

Al evaluar los proyectos, se eligió el Tránsito Este Oeste que se construye en Mayarí para realizar el estudio, esta obra abarcará el norte de las provincias Holguín, Las Tunas y

Camagüey. El complejo que se construye en la provincia de Holguín se dividió en varias etapas. La etapa I, comprende la presa Melones actualmente en construcción, que represará el Río Mayarí a 13 km del poblado de igual nombre y de allí el agua almacenada será llevada a través de un conjunto de túneles y canales hasta el embalse Sabanilla ya construido; la etapa II comprenderá el tramo Sagua-Melones, que comenzará en un embalse a construir en el río Sagua de Tánamo a 37 km de su desembocadura en el Océano Atlántico y a 15 Km del poblado Sagua de Tánamo, el agua almacenada será llevada a través de varios túneles hasta la presa Melones, esta etapa estará conformada principalmente por túneles. Este sistema hidrotécnico que implica grandes gastos para la economía del país, debe solucionar los problemas de abasto de agua al norte de las provincias implicadas en su construcción.

El terreno montañoso y premontañoso caracteriza la orografía de las zonas en las que se construyen las obras. Las rocas que predominan pertenecen al grupo de las básicas y ultra_básicas (serpentininas, gabros, diabasas, peridotitas, conglomerados, etc) que forman mayormente el complejo ofiolítico del norte y noreste de la provincia de Holguín, existiendo además intercalaciones de rocas calcáreas. En la región la vegetación es abundante, con predominio de árboles frutales, maderables y palmeras. Las lluvias son abundantes con un acumulado anual que varía entre 1100 mm y 1300 mm, aunque en la zona de Sagua de Tánamo es mayor. La presencia de arroyos permanentes e intermitentes caracteriza la hidrografía. Las frecuentes fallas y zonas de cizallas caracterizan la tectónica en la que se incluye la Falla Cauto-Nipe (anexo IV), aspecto que hace más complejo el estudio del agrietamiento y la tectónica (Mondejar., 2001; Trincado et al., 2005a).

Las investigaciones preliminares se realizaron en túneles que conforman la primera etapa del complejo de obras, específicamente en el Túnel Yagrumal Guaro, debido a la complejidad, representatividad litológica y presencia de agua.

El Túnel Yagrumal Guaro, está dividido en tres tramos con salida directa a la superficie y 6 frentes de trabajo, esta división disminuye el tiempo de ejecución y mejora la eficiencia y eficacia en algunos procesos tecnológicos.

Tramos del Túnel Yagrumal Guaro.

1^{er})- Yagrumal Ojo de Agua. 2^{do})- Ojo de Agua Serones. 3^{er})- Serones Salida Guaro.

IV.2 – Aplicación del procedimiento.

La aplicación del procedimiento sólo se llevó a cabo en túneles que se construyen en rocas fuertes poco porosas y agrietadas, por lo que se trabajó en el tramo Serones-Salida Guaro, diseñado en rocas básicas y ultra-básicas. Características y condiciones similares presenta al tramo Ojo de Agua Serones figura 8.

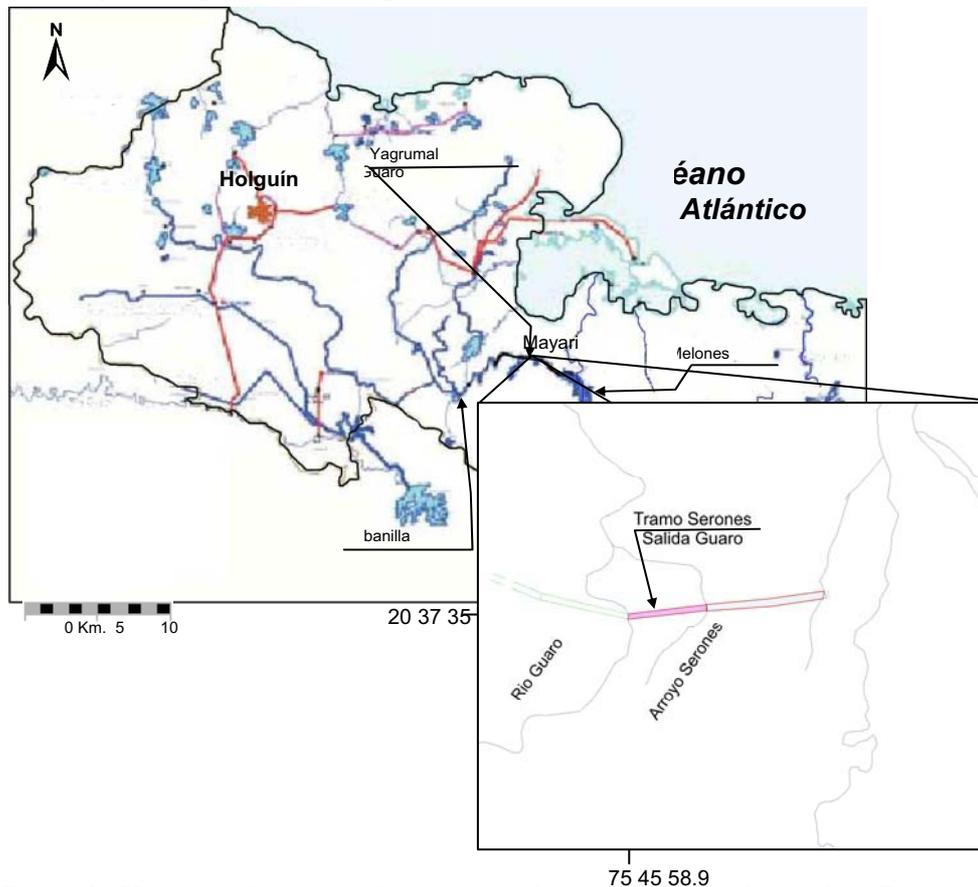


Figura 8) Ubicación del tramo objeto de estudio perteneciente al complejo Trasvase Este Oeste en la provincia de Holguín.

No se estudió el tramo Yagrumal Ojo de Agua diseñado en roca carbonatada carstica,

IV.2.1- Delimitación en la traza de la excavación de zonas de susceptibles a la presencia de agua.

Características generales del túnel Serones – Salida Guaro.

El túnel con dirección NWW-SEE tiene forma en la sección transversal ovoidal, altura de proyecto de 5,90 m y un ancho de 6.30 m. El arranque de la roca se realizará por perforación y voladura.

En la figura 9 se muestra un esquema del perfil del túnel donde se representan los principales elementos tectónicos y orográficos de la zona.

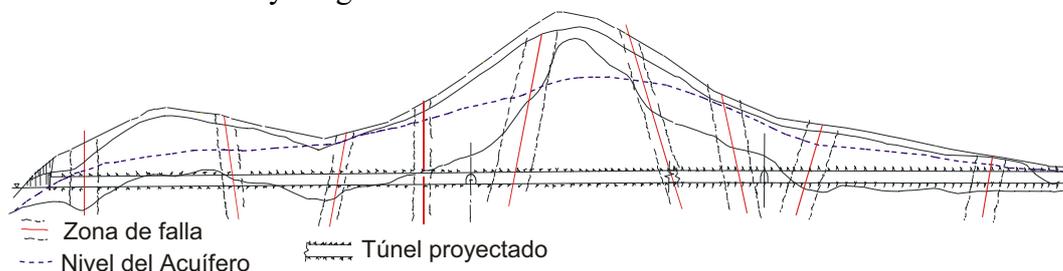


Figura 9 Esquema del perfil del túnel Serones - Salida Guaro.

En el área de construcción las lluvias son abundantes, registrándose un acomunado anual promedio de 1415,4 mm, con un registro máximo mensual de 523,3 mm de lluvia hasta junio del año 2010 (tomado de Dirección_De_Cuencas_Hidrográficas y Servicio_Hidrológico_Nacional 2010).

El túnel con una longitud aproximada de 750 metros, con dirección NWW-SSE se ubica entre las vaguadas del arroyo Serones y el río Guaro respectivamente. A unos 120 metros de la boca Guaro Serones, en la superficie del terreno, se encuentra un arroyo intermitente que coincide con la falla FV26 con dirección SSE – NNW según (Trincado et al., 2005b).

El agua circula en el macizo a través de las grietas, principalmente debido a que son predominantes las rocas fuertes y poco porosas. El coeficiente de filtración que varía entre 0,06 y 15,65 m/día, fue tomado de ensayos a presión realizados en las calas de perforación durante las investigaciones geológicas (Leyva et al., 2007). La expresión de Bear y otros

investigadores, (Bear et al., 1993) fue utilizada para determinar la permeabilidad en puntos donde no existen perforaciones.

Procesamiento del modelo digital de elevaciones (MDE).

Con la elaboración de los modelos digitales de: elevaciones del terreno, sentido del gradiente superficial en cada punto y el eje del túnel, se obtuvo la siguiente información:

Las escorrentías superficiales condicionadas por el gradiente tienen dirección SEE – NWW, se alinean en los extremos del túnel y escurren en dirección N-S, lo que facilita las condiciones para la ocurrencia de inundaciones de los emboquilles de la excavación (B1 y

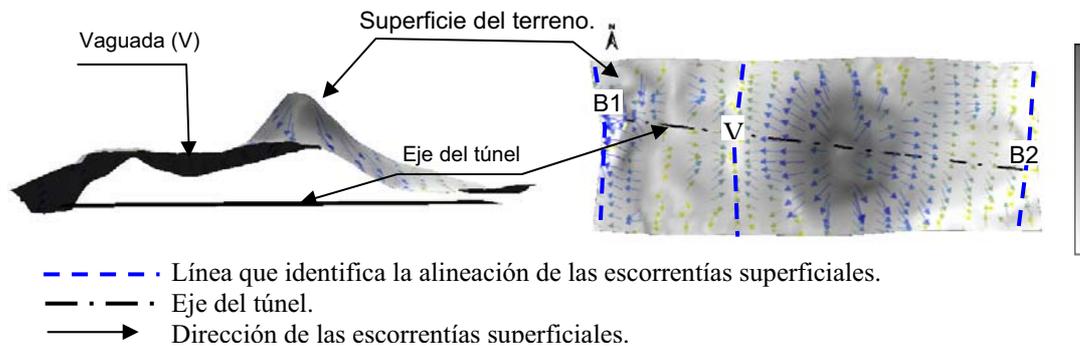


Figura -10 Características principales de la superficie bajo la cual yace el túnel Serones-Salida Guaro.

B2), figura 10.

Debido al gradiente hidráulico superficial y la poca pendiente en la vaguada (V), el agua proveniente de las elevaciones se alinea en dirección N-S; esta alineación constituye un indicio de falla que aumentaría la posibilidad de infiltración de agua, afectación del conjunto macizo excavación y deterioro de las características mecánico-estructurales del macizo.

Caracterización tectónica:

El túnel con aproximadamente 750 m de longitud atraviesa 9 fallas, en las que no se evidencia actividad geotectónica, pero sí existen vestigios de antiguos movimientos rumbodeslizantes en tres zonas donde el sistema NE desplaza las estructuras NS (figura 11); dos de estas zonas coinciden con áreas donde se alinean las escorrentías superficiales (figura 10), lo que aumenta la susceptibilidad del túnel en las zonas B y C. La orientación de las fallas con respecto a su

dirección se puede considerar favorable, debido a que el túnel intercepta perpendicularmente las estructuras.

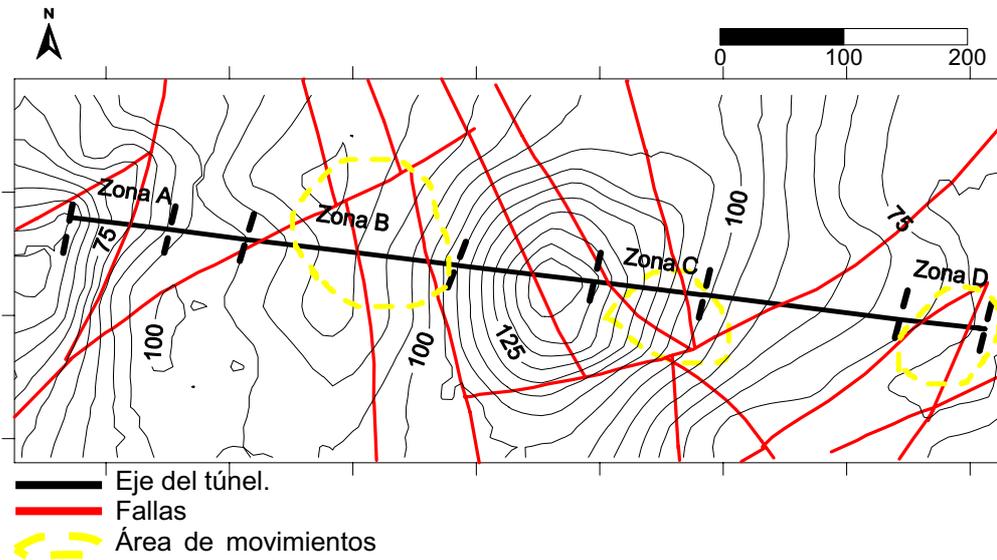
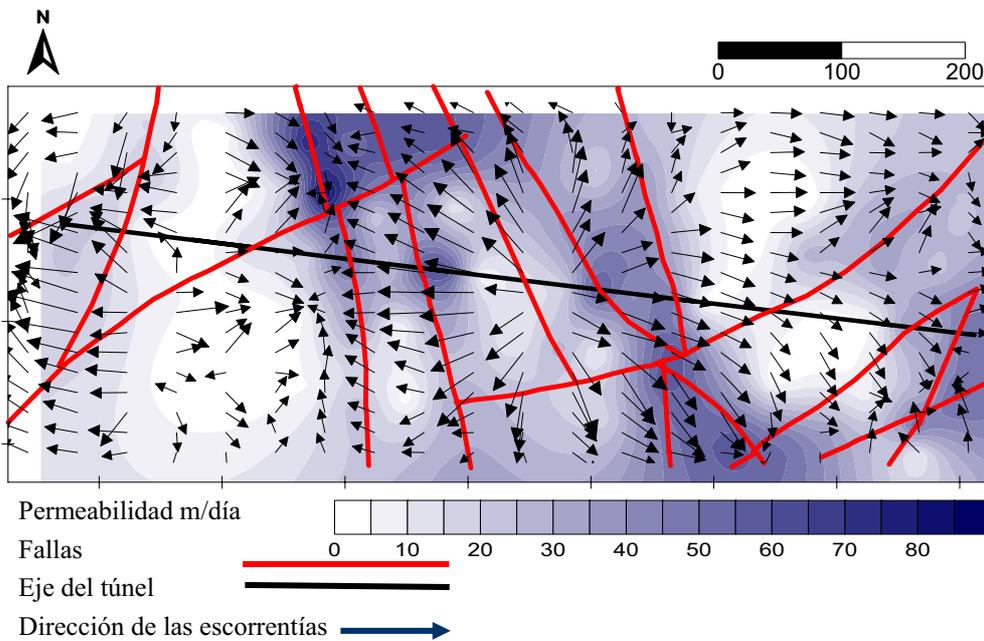


Figura 11 Distribución de fallas y movimientos tectónicos en el túnel Serones Salida Guaro.

Evaluación de los factores hidrográficos e hidrogeológicos que influyen en el proceso de filtración.

Al analizar las características hidrogeológicas del macizo y su relación con aspectos como dirección de las escorrentías superficiales y presencia de fallas, se pueden determinar zonas de



riesgo por inundación.

Figura 12 Distribución de las fallas, dirección de las escorrentías superficiales y zonas de permeabilidad en la traza del túnel Serones -Salida Guaro.

En la figura 12 se observa la coincidencia de las zonas de alta permeabilidad con zonas de convergencia de varias fallas y alineación de las escorrentías superficiales en el eje del túnel. En estas áreas se presentan todas las condiciones para que se produzcan infiltraciones de grandes volúmenes de agua, y un creciente deterioro del macizo rocoso.

En la figura 13 se observa que antes de iniciar los trabajos de excavación, la mayor parte del túnel se encontraba por debajo del manto acuífero, aspecto que favorece la infiltración de agua y el deterioro del conjunto macizo excavación.

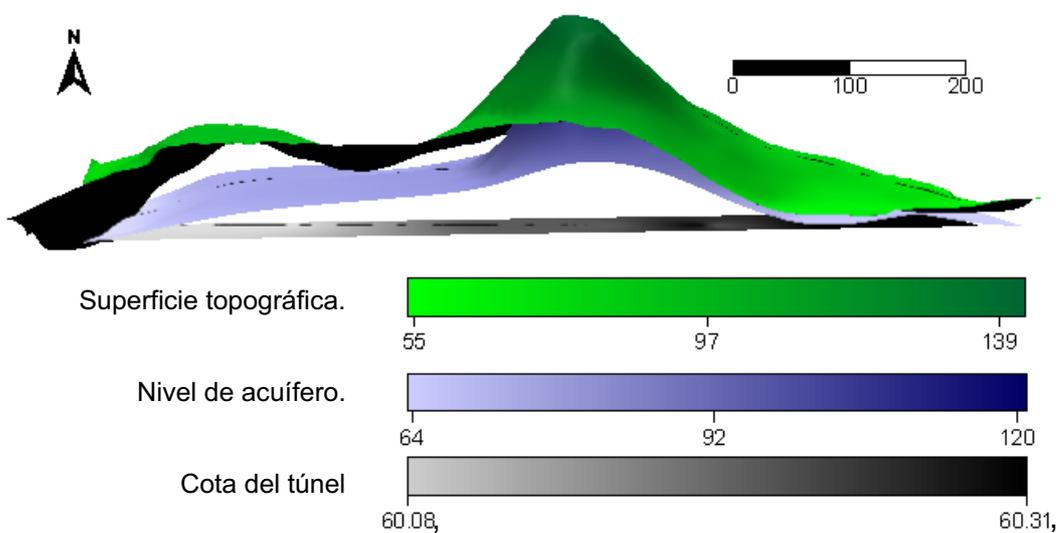


Figura 13 Ubicación de la cota del manto acuífero respecto a la superficie del terreno y el túnel Serones -Salida Guaro

Del análisis de los mapas y modelos digitales, se constata que los principales aspectos que inciden en el grado de susceptibilidad por la acción combinada de las filtraciones y otros fenómenos, son los siguientes:

- 1)-En superficie, la vaguada (V) y la alineación de las escorrentías superficiales.
- 2)-En el interior del macizo, la presencia de fallas y zonas de antigua actividad tectónica que coinciden con zonas de alta permeabilidad.
- 3)-La coincidencia tanto en superficie como en el interior del túnel de los factores condicionantes de la susceptibilidad por la presencia de agua.

Combinación de mapas de factores.

La combinación de los mapas y modelos se realiza a partir de lo establecido en el procedimiento (tabla 8), utilizando el método Heurístico y considerando los factores que facilitan el proceso de filtración de agua por el macizo rocoso, que a la vez contribuye a que se afecte el conjunto macizo-excavación.

Luego de superponer y procesar la información, se representa en un mapa donde se sintetizan los factores condicionantes. Se crean poliedros uniendo los valores de S_v en dependencia de la escala de susceptibilidad; finalmente en el eje del túnel se crean buffers o se demarcan las zonas considerando la magnitud del agrietamiento y la permeabilidad, (figura 14).

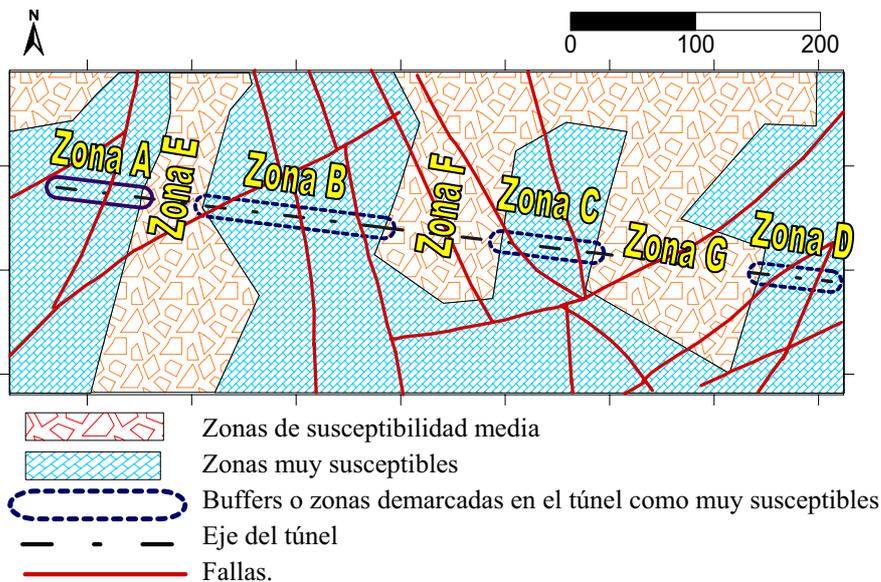


Figura 14 Zonificación de áreas según su susceptibilidad a la presencia de agua.

Zonas de susceptibilidad media.

En la figura 14 se observa la demarcación de las zonas de acuerdo al grado de susceptibilidad. La zona E se enmarca en el eje del túnel entre 81,4 y 145,1 metros a partir de la boca B1; su profundidad de ubicación varía entre 95 y 100 m.s.n.m; la pendiente de la superficie varía entre 5 y 10 %, la zona constituye por si misma una línea divisoria de las escorrentía superficiales; la permeabilidad es inferior a 10 m/días.

La zona F, se ubica a 316,3 m de la boca este del túnel (B1), la cota de la superficie varía entre 110 y 143 m.s.n.m; la permeabilidad oscila entre 6 y 17 m/día, con una pequeña área de permeabilidad superior en el contacto de la falla que atraviesa la zona (figura 12); el agrietamiento se considera de moderado a espaciado. La longitud total del tramo es de 111,7 m.

La zona G, se ubica a 71,5 m de la boca este del túnel (B2); la pendiente de la superficie varía entre 10 y 12 %; el agrietamiento se considera moderado (3 a 5 grietas/metro), aunque aumenta en la zona de falla; la permeabilidad media de la zona es de 4,6 m/día y la cota de la superficie varía entre 77 y 97 m.s.n.m.

Zonas muy susceptibles.

En la figura 14 se observa la demarcación de las zonas de acuerdo al grado de susceptibilidad.

La zona A se ubica en el extremo oeste del túnel; las cotas del relieve varían entre 60 y 80 metros, el gradiente tiene dirección oeste y condiciona las escorrentías superficiales; la pendiente media de la superficie varía entre 3 y 18 %, las estructuras geológicas están representadas por dos fallas con dirección NE y NNE; la permeabilidad varía entre 10 y 20 m/día, la falla constituye el principal agente condicionante del grado de trituración y la permeabilidad. La zona tiene una longitud de 81,4 metros.

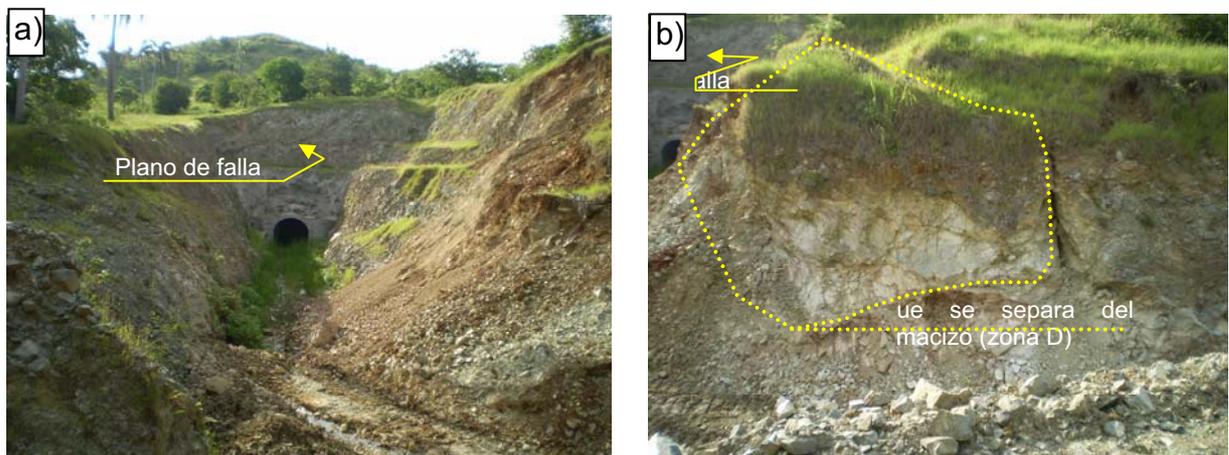
La zona B se enmarca entre los 145,1 y 316,3 metros de la boca oeste del túnel (B1). La cota del relieve varía entre 75 y 110 m.s.n.m; las pendientes y los flujos superficiales son convergentes en zonas de acumulación. La permeabilidad es mayor que en las restantes zonas, variando entre 9 y 62 m/día. Las estructuras geológicas están representadas por la intersección de dos sistemas de fallas con dirección NE y NNW observándose antiguos movimientos rumbodeslizantes. La zona tiene una longitud de 171,16 metros.

La zona C, se ubica a 232,45 metros de la boca oeste del túnel (B2), tiene una longitud de 89,8 m. La altura del terreno oscila entre 100 y 135 m.s.n.m; la pendiente media es superior a

5 % condicionando los flujos de agua en dirección SE-E. La tectónica está representada por dos fallas con dirección NW; la permeabilidad tiene valores entre 48 y 53 m/día.

La zona D se ubica en la boca este del túnel, las cotas del relieve varían desde 67 hasta 77 m.s.n.m, la pendiente de la superficie del terreno varía entre 3 y 6 % la que condiciona el gradiente y éste, las escorrentías superficiales y subterráneas que tienen dirección SE-E. Existen dos fallas con dirección N - NE. La permeabilidad varía entre 26 y 38 m/día, cercano a los planos de fallas es mayor. La zona tiene una longitud aproximada de 71,6 metros.

Las figuras 15 a y b muestran el grado de trituración y deterioro de la roca en la boca este del túnel, correspondiente a la Zona D, donde fue necesario abrir una trinchera para emboquillar el túnel, aspecto no considerado en el proyecto inicial. Además, en el techo del emboquille existe una falla que corta al túnel y genera un alto grado de trituración de la roca, favoreciendo el proceso de filtración y desprendimientos de bloques, con lo que se demuestra que existe correspondencia entre zonas consideradas muy susceptibles, a ser afectadas por la acción conjunta del agua y otros factores geoestructurales, determinados con la ayuda de la



cartografía digital y lo constatado en el terreno.

Figura 15 Debilitamiento estructural en la boca del túnel (B2).

IV.2.2- Caracterización de las zonas susceptibles por las filtraciones de agua.

Se caracterizarán las 4 zonas A, B, C, D, consideradas muy susceptibles a la presencia de agua.

Características naturales y antrópicas de la superficie del terreno.

Orografía de la zona. (Pendientes y depresiones)

La inclinación de la superficie bajo la que yace el túnel se comporta de la siguiente forma; en las zonas A y D no sobrepasa los 20 grados y en la C llega a 24 grados, en todos los casos la pendiente está a favor de las bocas B1 y B2 respectivamente, (figura 10); mientras que en la zona B la inclinación de la superficie favorece la vaguada (V), por donde escurre un arroyo intermitente.

Consolidación del terreno:

Este parámetro no se tomó en consideración debido a que la pendiente superficial dificulta el proceso de infiltración y el túnel se construye en roca fuerte agrietada, a una profundidad mayor de 8 m.

Características del macizo rocoso.

Características geoestructurales. (Estratificación, plegamientos y fallas)

El túnel con dirección SEE-NWW y una pendiente suave ($3 \times \text{‰}$), atraviesa 9 fallas que

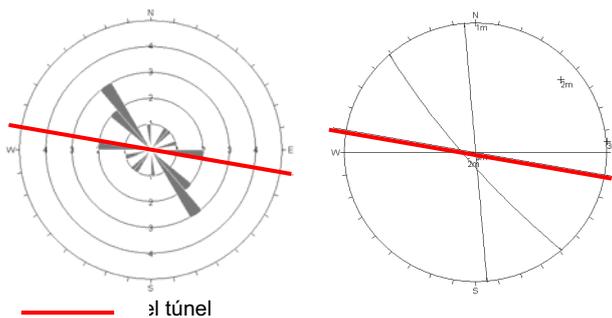


Figura 16 Diagrama de roseta y representación estereográfica de las principales fallas detectadas en el túnel Serones -Salida Guaro

tienen como direcciones predominantes NW-SE y NE-SW, formando ángulos superiores a 30 grados con respecto al túnel (figura 16), además se observa que las fallas tienen buzamientos superiores o iguales a 45 grados.

Propiedades físico-mecánicas.

Las rocas clasificadas como fuertes y masivas, poseen una resistencia que varía entre 217 y 413 Kgf/cm^2 , mientras las clasificadas como debilitadas tectónicamente, correspondientes a

las zonas A, B, C, D, la resistencia a compresión varía entre 174.39 y 196.33 Kgf/cm² (anexo IV,1a). Se obtuvo además un coeficiente de reblandecimiento mínimo de 0,48 en las zonas A, B, C, D y un máximo de 0,92 en las zonas menos afectadas por los factores tectónicos (anexo IV,1b).

Porosidad.

Se considera que este factor no ejerce gran influencia en el proceso de filtración de agua por el macizo (anexo IV,1a), debido a la alta densidad que posee el gabro en este túnel (3,08 a 3,29 t/m³) y el bajo porcentaje de poros.

Características del agrietamiento:

A partir de las mediciones realizadas en las zonas estudiadas, utilizando la clasificación propuesta por la sociedad internacional de Mecánica de Rocas, el agrietamiento se clasifica de la manera siguiente:

Según el **espaciamiento** se clasifica como moderado (entre 200-600mm) y espaciado (entre 600-2000mm), sólo en zonas de fallas el espaciamiento es menor.

Según la **abertura (b)** entre las caras de las grietas, se clasifica de grietas abiertas a grietas muy abiertas ($b > 0,50$ mm).

El **relleno** predominante entre caras de grietas es carbonato de calcio y arcilla, en zonas de fallas las grietas están rellenas además, con detritos rocosos.

En el anexo IV.3a aparecen las características del agrietamiento por zonas de estudio. El procesamiento de los elementos de yacencia del agrietamiento en las zonas de estudio arrojó que sus direcciones principales son: rumbo NNW – SSE y NWW – SEE, aunque existe una familia de grietas con rumbo NNE – SSW prácticamente perpendicular a la dirección del túnel. El procesamiento se realizó con la ayuda del software DIP 5.1. Las representaciones estereográficas aparecen en el anexo IV.3b.

Litología y Composición Mineralógica.

Litoestructuralmente, las rocas que forman el macizo donde se construye el túnel se clasifican como fuertes masivas y rocas debilitadas tectónicamente (grupos 1 y 4), según los grupos litoestructurales propuestos por Nicholson y Hencher en 1997, anexo III.2. En la tabla 12 se describen los tramos litoestructuralmente similares en los que se dividió el túnel.

Tabla 12 Características litoestructurales presentes en el túnel Serones –Salida Guaro.

Grupo	Grupos litoestructurales	Características y Tipo de roca	Tramos de túnel
1	Rocas fuertes masivas.	Gabros fuertes afectados por dos ó tres familias de grietas, puede ocurrir desintegración alrededor de las discontinuidades, produciéndose caída de bloques.	Zonas E, F y G
4	Rocas debilitadas tectónicamente.	Gabros altamente fragmentados susceptibles a colapso por el techo, desmoronamientos por los lados o caída de bloques de tamaño considerable.	Zonas A, B, C, D

Características hidrográficas e hidrogeológicas.

Hidrografía de la zona.

La dirección de las escorrentías superficiales se obtiene a partir del estudio cartográfico realizado para la zonificación de las áreas, evaluándose además el comportamiento del régimen de lluvia de la zona (municipio Mayarí desde el año 2000 hasta el 2007), lo que se recoge en la figura 17 donde se observa un aumento progresivo de los acumulados de lluvia en los últimos años; esta información se elabora a partir de los registros de lluvia del Servicio Hidrológico Nacional (Dirección de Cuencas Hidrográficas & Servicio Hidrológico Nacional, 2007b).

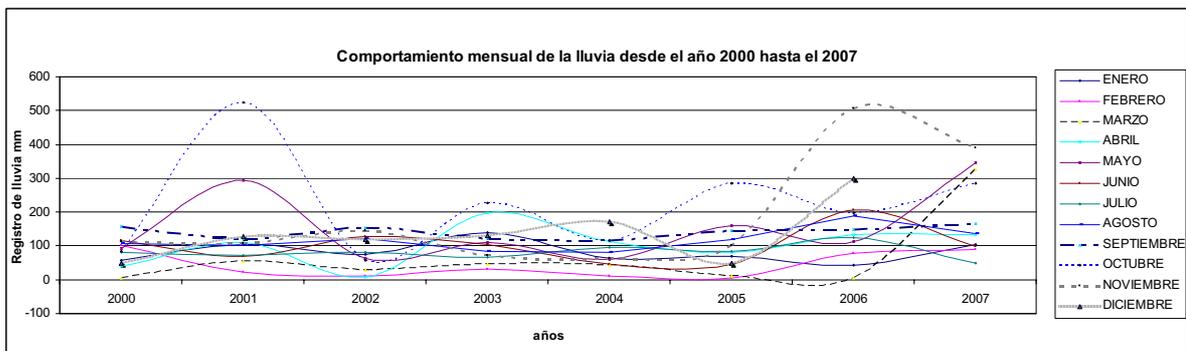


Figura 17) Comportamiento de la lluvia (años 2000 hasta el año 2007).

Profundidad de ubicación del nivel del manto acuífero.

Antes de la ejecución del túnel el nivel del acuífero se encontraba por encima de la cota en toda su traza; luego del inicio de la excavación, éste descendió en las zonas A, B, C y D sensiblemente (anexo IV.2) lo que se debió principalmente a la diferencia de presión que provocó el túnel y el intenso agrietamiento existente en las zonas, que favoreció el aumento de las filtraciones.

Determinación del coeficiente de filtración.

El coeficiente de filtración varía de $1,03 \times 10^{-3}$ hasta $6,60 \times 10^{-4}$ m/seg en las zonas menos susceptibles a ser afectadas por las filtraciones de agua, clasificándose como macizo poco permeable y poco agrietado en su mayor parte; mientras que en las zonas A, B, C, D el macizo se clasifica como permeable agrietado, fuertemente permeable y muy fuertemente permeables (tabla 3), en el anexo IV.4 se presentan los resultados analíticos del coeficiente de permeabilidad para cada tramo de túnel.

Determinación de la lámina de infiltración.

Este parámetro no se determinó para el túnel Serones Salida Guaro debido a que la inclinación de la superficie del terreno varía mayormente entre 20 y 24 grados, lo que disminuye la posibilidad de infiltración del agua.

Presencia de ríos arroyos o embalses.

El río Serones en la boca B2 y el río Guaro en la boca B1 contribuyen al aumento de la susceptibilidad a inundaciones en los tramos A y D. El arroyo intermitente ubicado en la vaguada, que coincide con una zona de falla (resultado del análisis cartográfico, figuras 10 y 11), hará más compleja la construcción bajo dicha zona, agravándose en la época de intensas lluvias.

Calidad del macizo rocoso.

El macizo se evalúa de calidad media y mala, a partir de la recuperación de testigo, según Deere, aunque en las zonas de fallas puede llegar a ser muy mala, (tabla 13).

Tabla 13 calidad del macizo rocoso en las zonas estudiadas

Zonas	Tramos	Calidad del macizo	Descripción
A	TM(1-2) 81,40 metros	25< RQD <50	Calidad mala
E	TM(2-3) 63,73 metros	50< RQD <75	Calidad media
B	TM(3-5) 171,1 metros	25< RQD <50	Calidad mala
F	TM(5-6) 111,71 metros	50< RQD <75	Calidad media
C	TM(6-7) 89,88 metros	25< RQD <50	Calidad mala
G	TM(7-9) 160,84 metros	50< RQD <75	Calidad media
D	TM(9-10) 71,6 metros	25< RQD <50	Calidad mala

Nota De la calidad del macizo se puede inferir su permeabilidad en las zonas donde no haya sido posible realizar ensayos.

Correlación entre la calidad del macizo y su coeficiente de permeabilidad.

Al aplicar el modelo de Weibull $y = a - b e^{-c x^d}$ al estudio del macizo formado por gabros, se obtuvo que los valores de ajuste para el mismo son: $a=45,691102$; $b=57,426521$; $c=0,64939953$ y $d=-0,61489753$. El coeficiente de correlación obtenido es $r=0,857$, para todo el modelo la prueba F de Fisher arrojó un resultado positivo con nivel de confianza de 0,95.

Para categorizar el macizo afectado por las filtraciones de agua ($K\omega$), pueden ser utilizados los valores de la tabla 8.

Determinación de las características de la excavación.***Profundidad de ubicación de la excavación.***

La profundidad de la excavación, tomada del anexo IV.2 y analizada por zonas de estudio, arrojó que la misma varía entre 9,41 y 81,50 metros, con lo que se identifican áreas donde se dificulta la utilización de algunas técnicas para el control del agua desde la superficie (I. M. Lee & Nam, 2004) (inyección y drenaje desde la superficie), tabla 14.

Tabla 14 Profundidad de ubicación de las zonas estudiadas

Zonas	Distancia	Prof media de ubicación
A	TM(1-2) 81,40 metros	16,135
E	TM(2-3) 63,73 metros	32,72
B	TM(3-5) 171,1 metros	29,22
F	TM(5-6) 111,71 metros	61,81
C	TM(6-7) 89,88 metros	45,77
G	TM(7-9) 160,84 metros	23,95
D	TM(9-10) 71,6 metros	15,15

Forma y dimensiones de la sección transversal.

La forma ovoidal de la sección transversal facilita la utilización de técnicas como el hormigón lanzado, geomembranas y geotextiles.

Destino y plazo de servicio.

A partir de la clasificación propuesta en la tabla 10, la excavación se considera de categoría III, por lo que la variante a seleccionar debe durar más de 15 años y con bajos costos por concepto de reparación y mantenimiento.

Método de excavación.

El arranque se realiza con el método de perforación y voladura, lo que incrementará el agrietamiento en el contorno de la excavación, y como consecuencia, aumentarán las filtraciones que serán más intensas en zonas de fallas.

Tipo de sostenimiento y/o fortificación propuesto.

Según proyecto original se propone la combinación de anclas y hormigón lanzado reforzado con fibras metálicas como el sostenimiento seleccionado, a partir de la clasificación geomecánica propuesta por Barton, el espesor propuesto es de 20 cm. en las zonas de fallas y 15 cm. en el resto de la obra. En ningún caso se propone tratamiento diferenciado a las zonas afectadas por las filtraciones de agua.

Resumen de la caracterización del túnel.

En la tabla 15 aparecen resumidos los elementos necesarios para la aplicación del algoritmo de selección de las técnicas para el control de las filtraciones de agua que afectan al túnel.

Tabla 15 Resumen de los aspectos principales que recoge la metodología e inciden en el proceso de selección de las técnicas para el control de las filtraciones de agua al Túnel Serones-Salida Guaro.

Zonas	Tramos y longitud (m)	Plazo de servicio y tipo de obra Categoría	Características del agrietamiento			Permeabilidad K m/días	(RQD) Calidad del macizo	Profundidad de ubicación de la excavación (m)
			Abertura	Espaciamiento	Grietas por metros			
A	TM(1-2) 81,40 metros	III	Abierta a moderadamente abierta	Cerrado a moderado	5,6,9, 12	15	25 < RQD < 50	16,135
E	TM(2-3) 63,73 metros	III	Parcialmente Abiertas y Abiertas	Moderado	4 a 8	5,62	50 < RQD < 75	32,72
B	TM(3-5) 171,1 metros	III	Abierta y moderadamente abierta	Cerrado	15 a 18	32,84	25 < RQD < 50	29,22
F	TM(5-6) 111,71 metros	III	Abierta a moderadamente abierta	Moderado a espaciado	4 a 8	11,18	50 < RQD < 75	61,81
C	TM(6-7) 89,88 metros	III	Abierta a moderadamente abierta	Cerrado	10 -12, 20	50	25 < RQD < 50	45,77
G	TM(7-9) 160,84 metros	III	Abierta a moderadamente abierta	Moderado	3 a 5	5,12	50 < RQD < 75	23,95
D	TM(9-10) 71,6 metros	III	Abierta a moderadamente abierta	Cerrado	10, 8, 12,16	38,48	25 < RQD < 50	15,15

Apoyado en el software Unwedge2, versión 3.005, se obtuvo que el factor de seguridad (FS) de las cuñas es superior a 15 en las zonas E, F y G consideradas de susceptibilidad media; además con la simulación se conoció que con el hormigón lanzado y el anclado puntual, es posible sostener el espacio denudado en los tramos E, F, G; figura 18 y tabla 16.

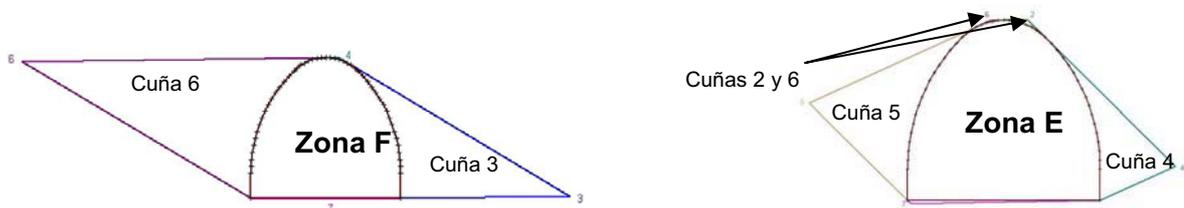


Figura 18) ubicación predominante de los cuñas en los tramos E, F.

Tabla 16 Características de las cuñas representativas de los tramos E y F

Zona F	FS	Volumen m ³	Área en la excavación m ²
Cuña 3	Estable	42,99	20,68
Cuña 6	14,0	132,28	47,08
Zona E			
Cuña 2	517,0	0,114	2,45
Cuña 6	52,6	0,006	0,48
Cuña 4	41,5	57,8	80,68
Cuña 5	13X1015	158,71	156,0

IV.2.3- Selección de las posibles técnicas para el tratamiento de las filtraciones.

La selección de las técnicas se lleva a cabo empleando el algoritmo de elección o el programa, creado por el autor de la tesis con ese propósito (Armando Cuesta et al., 2009), (figura 7), tomando en consideración las características de cada zona del túnel (tabla 15), enfatizando en las zonas clasificadas como muy susceptibles a la presencia de agua.

Zona A

El tramo se ubica a más de 10 metros de profundidad y debido al coeficiente de permeabilidad y la calidad del macizo, se clasifica categoría $K\omega=IV$. Como el caudal que se espera se considera bajo con una permeabilidad media, se analizarán las variantes que aparecen en el paso 18.

Paso 18

[Variante 12], (Di_t o Di_p)+Z+HLfrR+G+L+HLR [Variante 15], (II o IS) + Z + HL

[Variante 16], (II o IS) + Z + HL +G+ L+ HL

Zona E:

El tramo de túnel correspondiente a la zona E se clasifica como categoría $K\omega=III$ (medianamente afectado por el agua); el coeficiente de filtración varía entre 1 y 10 m/día; el RQD oscila entre 50 y 75 % (calidad del macizo) y la profundidad de ubicación es mayor de 10 metros. A partir de estas características se proponen las variantes 9 y 10 que aparecen en el paso 12 (V9 y V10).

[Variante 9], $(D_{i_t} \text{ o } D_{i_p}) + Z + HL_{rf} R$ [Variante 10], $(D_{i_t} \text{ o } D_{i_p, D_s}) + Z + HLR + G + L + HL$

Zona B

Este tramo del túnel se ubica a más de 10 m de profundidad, y debido al coeficiente de permeabilidad y calidad del macizo se clasifica como categoría $K_{\omega} = IV$, a diferencia del tramo anterior (Zona A), el macizo tiene menor calidad y el caudal que se espera es mayor. Del estudio previo se conoce que el cauce de un arroyo intermitente coincide con una zona de falla, por tales razones se podrían analizar las variantes del paso 18 ó 19, pero siendo la permeabilidad superior a 10 m/día y llegar hasta 60 m/día se decide evaluar las variantes 12, 15 y 16, del paso 18

Zonas F y G

La caracterización de estas zonas es similar a la zona E, por lo que se evaluarán las variantes 9 y 10 del paso 12.

Zonas C y D

La caracterización de estas zonas es similar a la zona B, pero se diferencia por la ausencia del cauce del arroyo, y una presión hidrostática mayor, debido al incremento de la columna de agua sobre el túnel, por lo que se evaluarán las variantes 12, 15 y 16 del paso 18.

IV.2.4- Elección de las variantes por zonas o tramos de túnel considerando los criterios de elección.

Tomando en consideración los factores condicionantes de los procesos de circulación de agua y su control, y empleando los criterios de elección, tabla 11, se elegirá la variante más adecuada para cada zona.

Zonas E, F y G

Las variantes posibles a utilizar en estas zonas son la 9 y la 10

Criterios Tecnológicos.

Se cuenta con las técnicas y existe posibilidad de abastecimiento de los insumos y varias empresas cuentan con personal calificado para su implementación. Los geotextiles y las láminas impermeables aplicadas en túneles no han tenido gran difusión en Cuba, debido a su elevado costo, aunque son muy duraderos.

Criterios Económicos.

Considerando que el macizo se clasifica como medianamente afectado por las filtraciones, el agua se puede controlar con la aplicación del hormigón lanzado de rápido fraguado reforzado con fibras, metálicas o de polímeros (variante 9), evitándose la utilización de la variante 10 que incrementaría los costos.

Criterios Ambientales.

Estas variantes no producen grandes afectaciones al medioambiente, siempre que el drenaje del macizo se utilice de forma temporal.

Zonas A, B, C, D.

Las variantes posibles a utilizar en estas zonas son: 12,15 y 16

Criterios Tecnológicos.

Se cuenta con las técnicas y existe posibilidad de abastecimiento de los insumos, varias empresas cuentan con personal calificado para su implementación. Los geotextiles y las láminas impermeables aplicadas en túneles no han tenido gran difusión en Cuba, debido a su elevado costo, aunque son muy duraderos.

Criterios Económicos.

Considerando que el macizo se clasifica como macizo afectado por las filtraciones (permeabilidad media y macizo muy agrietado), se hace necesario controlar el agua y

estabilizar el espacio laboreado, por lo que resulta factible aplicar inyecciones con doble propósito (variantes 15 y 16); resultando innecesario utilizar geotextiles y láminas impermeables que aumentarían el costo general de la obra.

Criterios Ambientales.

Estas variantes, no producen grandes afectaciones al medioambiente, aunque las inyecciones pueden contaminar las aguas subterráneas en dependencia de las sustancias que se utilicen, y el drenaje permanente causa severos daños al régimen hidrogeológico.

IV.3 - Resultados:

En la tabla 17 se muestran los resultados de la aplicación de los criterios de elección, a las variantes seleccionadas para cada zona del túnel, afectada por las filtraciones de agua.

Variante de proyecto: Hormigón lanzado reforzado con fibras, con espesor de 200mm. La técnica a utilizar en cada tramo afectado en el túnel, se eligió tomando la variante con mayor valor del coeficiente de elección C_{el} , tabla 17.

Tabla 17 Resultado de la aplicación de los criterios de elección de variante para cada zona

Criterios de elección	Zonas E, F y G		Zonas A, B D y C.		
	Variante 9 (Di_t o Di_p) + Z + HLrf R	Variante 10 (Di_p,Ds)+Z+H LR+G+L+HL	Variante 15 (II o IS) + Z + HL	Variante 16 (II o IS) + Z + HL +G+ L+ HL	Variante 12 (Di_t o Di_p)+ Z+HLfrR+G+L +HLR
$\bar{C1}$	3	2	3	2	2
C_{tg1}	3	1	3	1	2
$\bar{C2}$	3	2	3	1	2
C_{tg2}	3	2	3	2	2
$\bar{C3}$	3	2	3	1	3
C_{e1}	3	2	3	3	2
C_{e2}	3	2	3	3	1
C_{a1}	2	2	3	3	2
$\bar{C4}$	2	2	3	3	3
C_{a2}	2	2	3	3	3
C_{a3}	2	2	3	3	3
C_{a4}	2	2	3	3	3
\bar{C}_{el}	2,6	1,9	3,0	2,2	2,2

La variante 9 con valor del criterio de elección $C_{el} = 2,6$, consistente en el uso combinado de drenaje desde el interior de la excavación, zanja de desagüe longitudinal, hormigón lanzado

de rápido fraguado y reforzado con fibras metálicas, es la seleccionada para los tramos E, F y G.

La variante 15 con valor del criterio de elección $C_{el} = 3,0$, compuesta por inyección con doble propósito desde el interior o superficie del terreno, zanja de desagüe y hormigón lanzado, es la electa para los tramos A, B, C y D.

IV.4- Impactos producidos por la presencia de agua en túnel del trasvase Este Oeste.

Resulta imprescindible analizar los impactos ambientales, económicos y sociales, que se producen en los túneles del trasvase Este Oeste de Mayarí que guardan relación con la presencia de agua; específicamente los producidos en el tramo Serones - Salida Guaro.

Ejemplo de este impacto lo tenemos en el pozo que se utilizaba desde fecha anterior al 1930 para abastecer de agua por gravedad a la comunidad Serones, que se vio afectado desde el inicio de la construcción de los emboquilles de los túneles Ojo de Agua Serones y Serones Salida Guaro por el decrecimiento del nivel del manto acuífero, que condujo a su desecación.

Afectaciones:

- a) Desecación del pozo que abastecía a la comunidad Serones.
- b) Contaminación del acuífero:
 1. Por los restos de explosivos utilizados para el arranque de la roca.
 2. Por derrames de combustibles, aceites y lubricantes de la maquinaria empleada en el laboreo de las excavaciones.
- c) Contaminación de los arroyos Serones y Ojo de Agua por agentes similares a los que contaminaron el manto acuífero.
- d) Afectación a la producción agropecuaria en la comunidad y Valle Serones.

La influencia negativa de estas construcciones sobre las aguas superficiales y subterráneas, tuvo una repercusión económica y social tangible.

Actualmente la comunidad de Serones se abastece de agua mediante carros cisternas, lo que implica 5800 litros cada dos días, con un recorrido total de 48 km, un consumo de combustible de 24 litros aproximadamente, lo que significa 4380 litros al año con un costo mínimo de 4380 pesos por concepto de gasto de combustible.

Afectaciones con incidencia en los costos del túnel:

Algunas de las afectaciones durante el proceso de construcción entre los meses de abril y junio del 2006, que guardan relación con la presencia de agua se describen a continuación.

- a) Cambio del proyecto inicial a consecuencia de la mala calidad de la roca y la presencia de agua (se convirtieron 60 metros de túnel en canal, figura 15a).
- b) Atraso de 60 días como mínimo para comenzar a emboquillar el túnel por el lado de Serones.
- c) Una sobre excavación promedio de 3,5 m² a lo largo del túnel, siendo el agua uno de los agentes causales.

Se documentaron tres derrumbes:

1er derrumbe a unos 50 metros desde la entrada por Salida Guaro, produjo afectaciones a la salud de un topógrafo (tres meses de certificado) y aumento de gastos por concepto de pérdida de tiempo para continuar con las labores, empleo de personal y equipos para limpiar la excavación,

2do derrumbe a 220 metros desde la entrada por Salida Guaro tuvo implicación económica, por concepto de: afectaciones al equipo de perforación, pérdida de tiempo para continuar con las labores, empleo de personal y equipos para limpiar la excavación,

3er derrumbe a 435 metros desde la entrada por Salida Guaro el que sólo tuvo implicación económica, por concepto de pérdida de tiempo para continuar con las labores, empleo de personal y equipos para limpiar la excavación.

Los derrumbes traen como consecuencia, la utilización de aproximadamente 3 a 5 horas como mínimo para la evacuación de las rocas, la utilización de equipos de carga y de transporte. Todo esto trae como resultado la disminución de la productividad en el avance del túnel, consumo adicional de combustibles, lubricantes y desgaste de los equipos que intervienen en el escombreo. Estas, entre otras afectaciones, producen un incremento promedio en el costo/metro de túnel de un 1,5 % según la DIP del trasvase, lo que significa 789,3 pesos/metro de túnel.

La utilización del procedimiento propuesto integrado en la etapa de proyecto, permitiría minimizar los costos adicionales por metro de túnel e incluir variantes para controlar el agua que afecta estas excavaciones subterráneas.

Conclusiones

1. La delimitación de zonas susceptibles a la acción combinada del agua con factores geológicos estructurales, disminuye el volumen de trabajo previo orientado al tratamiento de las filtraciones que afectan al conjunto macizo excavación a corto y largo plazo.
2. Con las técnicas propuestas a partir de la aplicación del procedimiento, se pueden controlar las afectaciones que produce el agua debido a la coincidencia que existe entre éstas y la forma en que se manifiestan las filtraciones y el grado de afectación al conjunto macizo excavación.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES:

1. Se elaboró un procedimiento que permite elegir de forma racional la técnica adecuada para el control del agua que afecta excavaciones subterráneas de pequeña y mediana sección, laboreada en macizos rocosos fuertes, poco poroso y agrietado, a partir de la caracterización de los factores condicionantes de la circulación del agua, y los criterios de elección técnicos, tecnológico, económicos y ambientales
2. La aplicación del procedimiento establecido al caso concreto del Túnel Serones Salida Guaro del trasvase Este Oeste permitió comprobar su aplicabilidad al elegir la variante 9 consistente en el uso combinado de drenaje desde el interior de la excavación, zanja de desagüe longitudinal, hormigón lanzado de rápido fraguado y reforzado con fibras metálicas, para las zonas E ,F y G, y la variante 15 compuesta por inyección con doble propósito desde el interior o superficie del terreno, zanja de desagüe y hormigón lanzado, para los tramos A, B, C y D las que se corresponden plenamente con la situación real presente en el túnel.

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES:

1. Introducir en las empresas que realizan proyectos de excavaciones subterráneas, el procedimiento propuesto en la elección de las técnicas para el tratamiento de las filtraciones.
2. Introducir en las empresas que realizan proyectos de excavaciones subterráneas, la primera etapa del procedimiento, adecuada para la selección de la traza idónea de túneles.
3. Evaluar la influencia del agua en el comportamiento mecánico estructural del conjunto macizo excavación.

BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.

- 1- Almaguer, Y. (2001). Análisis de estabilidad de taludes a partir de la evaluación geomecánica del macizo serpentinitico de Moa. Unpublished Mestría, ISMM Moa Cuba.
- 2- Almaguer, Y. (2005). Evaluación de la susceptibilidad del terreno a la rotura por desarrollo de deslizamientos en el yacimiento punta gorda. Unpublished Tesis Doctoral, ISMM, Moa, Cuba.
- 3- Anagnostou, G. (1996). The influence of tunnel excavation on the hydraulic head. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 33(4), 187A-188A.
- 4- Anagnostou, G. (2006). In Tunnel stability and deformation in water-bearing ground.
- 5- Anónimo_16. (2005). Cálculo de caudales máximos. Método Racional, 2007, from <http://www.miliarium.com/Proyectos/Carreteras>
- 6- Anónimo. (1982). Diseños de presas pequeñas. Cuba: Revolución.
- 7- Anónimo. (2004). Estimación de caudales de agua infiltrada en los túneles
- 8- <http://fluidos.eia.edu.co>.
- 9- Anónimo. (2004). Estimación de caudales de agua infiltrada en los túneles: <http://fluidos.eia.edu.co>.
- 10- Anónimo_0. (2004). Necesidad del control de filtración, from http://www.ing.udep.edu.pe:80/civil/material/vial/Cuarto%20Trimestre/GTV/Germ%20E1n%20Gallardo/GTV-Cap4%202_.pdf
- 11- Araújo, E.M.P.d., et al. (1998). Influência da variação da permeabilidade na estabilidade de poços de petróleo. Retrieved 10/07/2007, from http://www.qtep.civ.puc-rio.br:80/img_banco/artigos/3SBMR-SaoPaulo-2002.pdf
- 12- Bai, M., et al. (1996). Correlation between Rock Permeability and Stress-Induced Anisotropy. *International Journal of Rock Mechanical & Mining Sciences.*, 35(4), 474-475.
- 13- Barton, N., et al. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel Support. *Rock Mechanics*, 6(4), 183-236.

- 14- Bear, J., et al. (1993). Flow and contaminant transport in fractured rock. unpublished manuscript, San Diego.
- 15- Bernabé, A.E. (2006). Utilização sustentável de água subterrânea como forma de ganho de competitividade e disponibilização de recursos hídricos para a população. Unpublished Master, Universidad Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- 16- Blanco, R. (1995). Construcción de pozos en condiciones minero-geológicas difíciles. Habana Cuba: Félix Varela.
- 17- Bonachea, J. (2006). Desarrollo, aplicación y validación de procedimiento y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debido a procesos geomorfológicos. Unpublished Doctoral, Universidad de Cantabria, Cantabria.
- 18- Camberfort, H. (1968). Inyección de Suelo. Barcelona, España: Omega.
- 19- Canales, M.D., & Olmos, I.L. (1998). Water-conveying tunnel: third phase.
- 20- Carrara, A., et al. (1995). In A. Carrara & F. Guzzetti (Eds.), GIS technology in mapping landslide hazard (pp. 135 -175). Paper presented at the Geographical information systems in assessing natural hazards, The Netherlands.
- 21- Castany, G. (1971). Tratado práctico de las aguas subterráneas (1ra ed.). Barcelona: Omega.
- 22- Corominas, J. (1987). In S.G. Ambiental (Ed.), criterios para la confección de mapas de peligrosidad de movimientos de ladera (pp. 193-201). Paper presented at the Riesgos Geológicos, Madrid. IGME.
- 23- Corominas, J. (1992). In Movimientos de ladera: predicción y medidas preventivas (pp. 55-77). Paper presented at the 1r Congreso Iberoamericano sobre Técnicas aplicadas a la Gestión de emergencias para la Reducción de Desastres Naturales, Valencia.
- 24- Coulter, S., & Martin, C.D. (2006a). Effect of jet-grouting on surface settlements above the Aeschertunnel, Switzerland. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(5), 542-553.

- 25- Coulter, S., & Martin, C.D. (2006b). Single fluid jet-grout strength and deformation properties. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(6), 690-695.
- 26- Crouthamel, D., et al. (2005). Pre-excavation grouting design guidelines for hard rock excavations, from www.jacobssf.com/articles/2005%20Crouthamel%20Klein%20Hard%20Rock%20Pre-Excavation%20Grouting.pdf -
- 27- Cuesta, A. (1997). Impermeabilización de Obras subterráneas. Unpublished Tesis de Maestría, Ismm de Moa, Moa, Cuba.
- 28- Cuesta., A. (1999). In Propuesta de un modelo matemático que me permita valorar cualitativamente zonas del complejo OFIOLÍTICO del norte y noreste de la provincia de Holguín. Paper presented at the Primer simposio Internacional (regional granma): La geomecanica aplicada a la construcción, Granma, Cuba.
- 29- Cuesta, A., et al. (2008). Procedimiento para el control de filtraciones en excavaciones subterráneas. Caso de estudio túnel Serones – Salida Guaro, *Geología y Minería* (Vol. 24).
- 30- Cuesta, A., et al. (2009). Delimitación de zonas susceptibles por filtraciones en el túnel Serones-Salida Guaro del trasvase Este-Oeste, *Geología y Minería* (Vol. 25).
- 31- Cuesta, A., et al. (2009). In Automatización del proceso de elección de la técnica adecuada para controlar el agua que afecta una excavación subterránea. Paper presented at the 3^{ra} Convención de Ciencias de la Tierra, La Habana Cuba. SCG.
- 32- Cuesta, A., et al. (2007). In Procedimiento para seleccionar el sistema idóneo para controlar el agua que puede afectar el proceso de construcción de una obra subterránea. Paper presented at the 2da Convención de Ciencias de la Tierra, La Habana Cuba. SCG.
- 33- Custodio, E., & Llamas, M. (1997). *Hidrogeología subterránea* (3^{ra} ed.). Barcelona España: Omega S.A.

- 34- Chu, X., & Marino, M.A. (2005). Determination of ponding condition and infiltration into layered soils under unsteady rainfall. *Journal of Hydrology*, 313, 195-207.
- 35- Dalmalm, T. (2004). Choice of Grouting Method for Jointed Hard Rock based on Sealing Time Predictions. Unpublished PhD, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- 36- De_Miguel, C. (1999). Hidrogeología aplicada. Habana, Cuba: Félix Varela.
- 37- Dirección_De_Cuencas_Hidrográficas, & Servicio_Hidrológico_Nacional. (2007a). Análisis de lluvia embalses y acuíferos(abr07)
- 38- Retrieved 20-10-2007, 2007, from <http://www2.hidro.cu:80/documentos/boletines/Bolabr07.pdf>
- 39- Dirección_De_Cuencas_Hidrográficas, & Servicio_Hidrológico_Nacional. (2007b). Análisis de lluvia embalses y acuíferos(nov07). Retrieved 20-Dec-2007, 2007, from <http://www2.hidro.cu:80/documentos/boletines/Bolnov07.pdf>
- 40- El.Tani, M. (2003). Circular tunnel in a semi-infinite aquifer. *Tunneling and Underground Space Technology*, 18(1), 49 - 55.
- 41- Esterhuizen, G., & Karacan, C. (2007). A methodology for determining gob permeability distributions and its application to reservoir modeling of coal mine longwalls
- 42- Franco, D.P., et al. (1996). Flujo no lineal impermanente hacia un pozo en un acuífero no confinado. In D.P. Franco (Ed.), *Contribuciones a la hidrogeología y medio ambiente en Cuba*.
- 43- Franco, D.P. (2002). Evolución histórica de las fórmulas para expresar las pérdidas de carga en tuberías. Segunda parte: Desde los trabajos de Darcy hasta los de Stanton. *INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL*, XXIII(3), 6.
- 44- Ganz, C. (2005, 07-03-07). Extracción de agua del túnel ferroviario más largo del mundo, 2006

- 45- Gavilanes., H., & Andrade., B. (2004). Introducción a la ingeniería de túneles caracterización, clasificación y análisis geomecánico de macizos rocosas. Quito, Ecuador: AIME.
- 46- Geoconsult, S.A. (1996). Manual de túneles. In (pp. 211). País Vasco Dpto. Obras publicas.
- 47- González-Nicieza, C., et al. (2007). Influence of the depth and shape of a tunnel in the application of the convergence–confinement method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23, 46-64.
- 48- González, A. (2005). Hidráulica del Macizo Rocoso, Riesgos Geodinámicos en la Actividad Minera. Moa Cuba: Cytod XIII
- 49- González_de_Vallejo., L., et al. (2002). Ingeniería Geológica. Madrid.
- 50- Goodman, R., & Kieffer, S. (2002). BEHAVIOR OF ROCK IN SLOPES
- 51- Gothäll", R. (2006). Rock Mass Response during High Pressure Grouting. Unpublished Masters, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- 52- Hansen, A. (1984). In J. Wiley & Sons (Eds.), *Landslide hazard analysis* (pp. 523-602). Paper presented at the Slope Stability.
- 53- Harris, J.S., & Pollard, C.A. (1986). In J.P. Cripps (Ed.), *Some aspects of groundwater control by ground freezing and ground grouting methods* (pp. 455 - 466). Paper presented at the *Groundwater in Engineering Geology.*, London. Geological Society.
- 54- Hartlén, J., & Viberg, L. (1988). In Bonnard (Ed.), *Evaluation of landslide hazard* (Vol. I, pp. 1037-1057). Paper presented at the 5th. International Congress on Landslides, Lausanne.
- 55- Hoek, E., & J, B. (1981). *Rock slope engineering*. London: Institute of Mining and and Metallurgy.
- 56- Hoek., E., & Brown., H. (1986). *Underground excavation in hard rock* (I ed.). England: Institution of Mining and Metallurgy.
- 57- <http://concretonline.com>. Masterseal® 345. Sustituto de los antiguos métodos de impermeabilización en túneles. Retrieved 28-09, 2005, from <http://concretonline.com>

- 58- <http://portal.danosa.com/danosa>. (2006, 2006). Líquidos impermeabilizantes (Slurry), 2007, from <http://portal.danosa.com/danosa/CMServlet?node=F125&lng=1&site=1&bg=1>
- 59- Huguet, M., et al. (2000). Filtración hacia túneles en medio fracturados: Simulación dinámica del avance de la excavación. Revista Obras Publicas, Madrid España, 3(397), 33-49.
- 60- Infante, P.S., et al. (2007, 20/06/07). Hidráulica General, 2007, from <http://fing.uncu.edu.ar:80/catedras/archivos/hidraulica/UNIDAD%208.pdf>
- 61- İşcan, A.G., et al. (2006). Estimation of permeability and rock mechanical properties of limestone reservoir rocks under stress conditions by strain gauge. Journal of Petroleum Science and Engineering, 53(1-2), 13-24.
- 62- J M Galera Fernández, et al. (2001). Estudio geológico geotécnico del túnel de Bracons
- 63- Kim, J.K., et al. (2006). Methods of re-mining tunnel T08 at THSRC contract C230 after a collapse. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 21(3), 320-320.
- 64- Kolymbas, D., & Wagner, P. (2006). Groundwater ingress to tunnels - The exact analytical solution. Tunnelling and Underground Space Technology., 22(2), 23 - 27.
- 65- Kotake, N., et al. (1995). Design for umbrella method based on numerical analyses and field measurements. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, 32(3), 136A-136A.
- 66- Kovári, K., & Anagnostou, G. (1996). Design of grouting cylinder for a deep alpine tunnel, 2nd International Conferenze on Ground Improvement Geosystems. Tokyo, Japan.
- 67- Lee, C., & Farmer, I. (1993). Fluid flow in discontinuous rocks.
- 68- Lee, I.M., & Nam, S.W. (2001). The study of seepage forces acting on the tunnel lining and tunnel face in shallow tunnels. Tunneling and Underground Space Technology, 16(1), 31-40.

- 69- Lee, I.M., & Nam, S.W. (2004). Effect of tunnel advance rate on seepage forces acting on the underwater tunnel face. *Tunneling and Underground Space Technology*, 19(3), 273-281.
- 70- Legra, A., & Silva, O. (2007). La investigación Científica Conceptos y Reflexiones. In A. Legra (Ed.).
- 71- Leroi, E. (1996). In *Landslide hazard-Risk maps at different scales: objectives, tools and developments* (Vol. I, pp. 35-51). Paper presented at the 7th. Int. Symp. on Landslides, Trondheim.
- 72- Leyva, C., et al. (2007, 20 al 23 marzo del 2007). In K.E. Camba & R.R. Pallí (Eds.), *Sistema de Investigación Ingeniero-Geológico Tránsito Este-Oeste Tramo Sagua-Melones* (pp. 21). Paper presented at the VIII Taller Internacional Informática y Geociencias, La Habana. Sociedad Cubana de Geología.
- 73- Li, D., et al. (2009). Case studies of groundwater flow into tunnels and an innovative water-gathering system for water drainage. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24, 260-268.
- 74- Li, Z., & Reddish, D.J. (2004). The effect of groundwater recharge on broken rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 41, 409.
- 75- Lipponen, A., et al. (2005). Effect of water and geological factors on the long-term stability of fracture zones in the Pääjärve Tunnel. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 42, 3-12.
- 76- López-Jimeno, C., et al. (1997). *Manual de túneles y obras subterráneas* (Vol. I). Madrid España: Entorno Gráfico, S.L.
- 77- López-Jimeno., C., et al. (2004). *Ingeo Túnel* (3^{ra} ed., Vol. I). Madrid España: Entorno Grafico, S.L.
- 78- Marinos, P.-G. (2001). *Tunnelling and mining in karstic terrain; an engineering challenge*, *Geotechnical & Environmental Applications of Karst Geology & Hydrology*.
- 79- Martínez-Silva, R. (2001). *Construcción Subterránea*. Pinar del Rio: Universidad de Pinar del Rio.

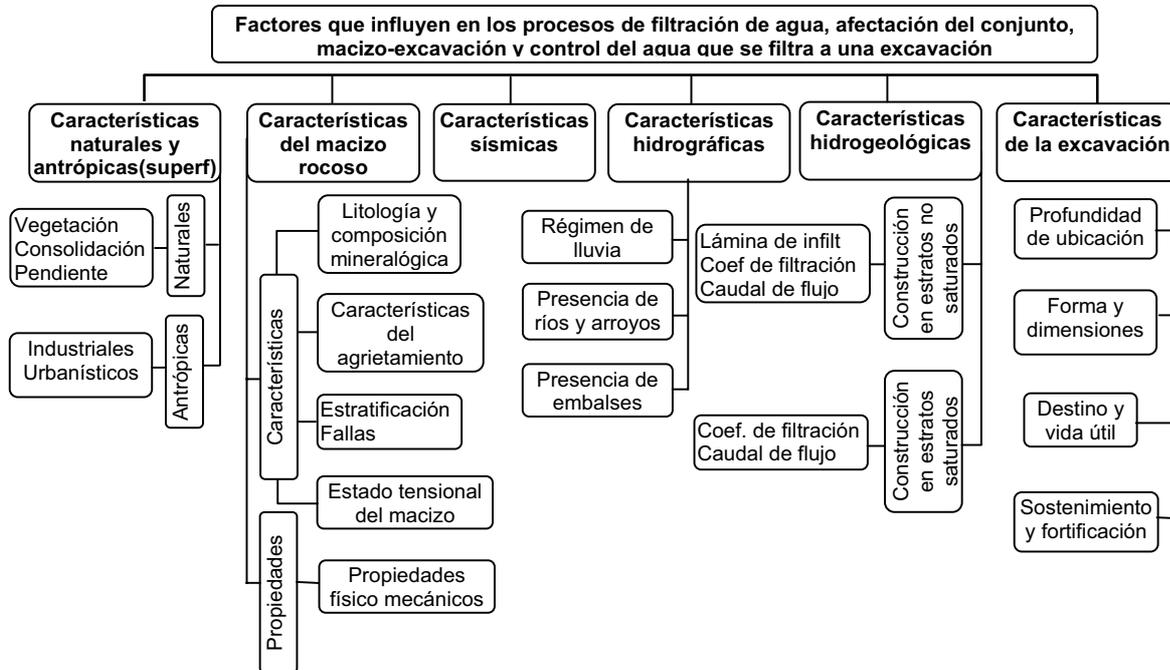
- 80- Master_Builders_Technologies. (2004). Novanol Sistema de impermeabilización con láminas de PVC-P. Madrid: Degussa.
- 81- Mondejar., O. (2001). Metodología para la elección de los sostenimientos en excavaciones subterráneas de pequeña sección influenciadas por la acción sísmica. Unpublished PhD., ISMM, Moa Holguin.
- 82- Morrilla, A. (1988). Influencia del drenaje subterráneo en el comportamiento estructural de las carreteras. Revista Obras Publicas, Madrid España, 99 – 129.
- 83- Nandi, A., & Shakoor, A. (2010). A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. Engineering Geology, 110(1-2), 11-20.
- 84- Nilsen, B., & Palmström, A. (2001). Stability and water leakage of hard rock subsea tunnels. Tunneling and Underground Space Technology, 497-502.
- 85- Palmström, A. (2005). Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD) Tunneling and Underground Space Technology, 20, 362 - 377.
- 86- Panthi, K.K. (2006). Analysis of Engineering Geological Uncertainties Related to Tunnelling in Himalayan Rock Mass Conditions. Unpublished Doctoral, Norwegian University of Science and Technology Trondheim.
- 87- Pearlman, S. (1998). Jet grouting: New directions. Civil Engineering, 68(8), 44.
- 88- Pfeifle, T., et al. (1998). In Experimental Determination of the Relationship Between Permeability and Microfracture-Induced Damage in Bedded Salt (pp. 15-19). Paper presented at the 12. International conference on computational methods in water resources, Greece.
- 89- Rivas, J. (2006). Sistema de Impermeabilización posterior de túneles y galería– Nuevo Sistema Oberhasli: Sika.
- 90- Salas, J.A.J., & González, A.Á.S. (1984, 20/05/1998). Condiciones geotécnicas del túnel bajo el Estrecho de Gibraltar. Retrieved 3227, 131, from http://ropdigital.ciccp.es:80/pdf/publico/1984/1984_julio-agosto_3227_03.pdf

- 91- San-Ramán, J.S. (2006). Hidrología Hidrogeología, 2007, from <http://web.usal.es/~javisan/hidro/>
- 92- Santacana, N. (2001). Análisis de la susceptibilidad del terreno a la Formación de deslizamientos superficiales y Grandes deslizamientos mediante el uso de Sistemas de información geográfica. Aplicación a la cuenca alta del río Llobregat. Unpublished Tesis doctoral, UPC, Barcelona.
- 93- Santiague, Y., & Cuesta, A. (2005). Solución a problemas de infiltración del agua en túneles. Actualización del proyecto de construcción., Forum de Ciencia y Técnica (pp. 26). Holguín: ISMM.
- 94- Serafim, J.L. (2000). Influencia del agua intersticial sobre el comportamiento de los macizos rocosos.
- 95- Shin, H.-S., et al. (2009). Effective control of pore water pressures on tunnel linings using pin-hole drain method. Tunnelling and Underground Space Technology(24), 11.
- 96- Siddle, H.J. (1986). In J.P. Cripps (Ed.), Groundwater control by drainage gallery at Aberfan, South Wales (pp. 533 -540). Paper presented at the Groundwater in Engineering Geology, London. Geological Society.
- 97- Stille, H., & Palmström, A. (2008). Ground behaviour and rock mass composition in underground excavations. Tunnelling and Underground Space Technology, 23, 46-64.
- 98- Suárez_Díaz, J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales (pp. 548): Universidad Industrial de Santander, UIS.
- 99- Trincado, C., et al. (2005a). Tránsito Este-Oeste túneles del tramo Melones - Sabanilla Túnel Yagrumal - Guaro. (pp. 18). Holguín: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Holguín.
- 100- Trincado, C., et al. (2005b). Proyecto ingeniería básica y de detalle, Túnel Yagrumal Guaro, Memoria Descriptiva., Tomo I (pp. 18). Holguín: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos Holguín.

- 101- Weia, Z.Q., et al. (1995). Permeability predictions for jointed rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 32(3), 251-261.
- 102- Yong-IL, K., et al. (1999). Modeling the effect of water, excavation sequence and rock reinforcement with discontinuous deformation analysis. . *Intenational Journal of Rock Mechanical & Mining Sciences.*, 36, 949-970.
- 103- Yuan, Y., et al. (2000). Tunnel Waterproofing Practices in China. *Tunneling and Underground Space Technology*, 15(2), 227-233.
- 104- Zhang, J., et al. (2004). Influence of stress on permeability around a borehole in fractured porous media. *International Journal Rock Mechanical Mining Science*, 41(3).
- 105- Zhang, J., & Shen, B. (2004). Coal mining under aquifers in China: a case study. *Intenational Journal of Rock Mechanical & Mining Sciences.*, 41, 629 - 639.

ANEXOS

Anexo I.1 Forma en que se agruparon los factores que inciden en los diferentes procesos.



Anexo II.1 Encuesta presentada a los expertos.



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
DrC Antonio Núñez Jinérez

Estimado colega apoyado en su experiencia, nos dirigimos a Ud, ya que necesitamos sus criterios para valorar la influencia de los factores y parámetros que aparecen en la tabla, sobre los procesos de filtración de agua, las vías para el control su control y el deterioro del macizo en acción conjunta con el agua y fenómenos geoestructurales. Todo referido a obras subterráneas.

La tabla será llenada de acuerdo con las indicaciones siguientes:

Se seleccionará con una X las variables que UD. considere que influya determinadamente en cada uno de los procesos (filtración, control de la filtración y deterioro del terreno).

Será muy útil que Ud. agregará, si así lo considera, otros parámetros que orienten su selección, o no estén recogidos en la tabla

<u>Parámetros o factores influyentes.</u>			N° Criterio.	Filtración	Control de las filtraciones.
				¿ Influye?	¿ Influye?
Características antrópicas y naturales.	<i>Naturales.</i>	Vegetación.	1.		
		Consolidación.	2.		
		Pendiente.	3.		
	<i>Antrópicos.</i>	Industriales.	4.		
		Urbanísticos.	5.		
Características del macizo rocoso.	<i>Características.</i>	Litología.	6.		
		Composición mineralógica.	7.		
		Plegamiento.	8.		
		Fallas.	9.		
		Estratificación.	10.		
		Caract del agriet.	11.		
		Porosidad .	12.		
		<i>Propiedades.</i>	Propiedades físico-mec.	13.	
	Estado tensional	14.			
	Características sísmicas.		15.		
Caract. hidrográfica.	Regimen de lluvia.	16.			
	Presencia de ríos y arroyos.	17.			
	Presencia de embalses.	18.			
Régimen hidrogeológico.	<i>Construcción en estratos no saturados.</i>	Lámina de infiltración.	19.		
		Coef. de filtración.	20.		
		Caudal del flujo de filtración.	21.		
	<i>Construcción en estratos saturados.</i>	Coef. de filtración.	22.		
	Caudal de flujo.	23.			
Características de la excavación.	Profundidad de ubicación.	24.			
	Forma y dimensiones de la excavación.	25.			
	Destino y vida útil de la excavación.	26.			
	Método de arranque.	27.			
	Tipo de sostenimiento y/o fortificación.	28.			

Muchas gracias por colaborar con nuestras investigaciones

Anexo II.2 Encuesta enviadas a los expertos para seleccionar los más competentes.

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

Doctor Antonio Núñez Jiménez

A: -----

Al reconocer en usted, un experimentado y prestigioso especialistas en al campo de la Minería, profundo conocedor de las construcciones subterráneas y la geomecánica, solicito su colaboración en calidad de posible experto para la valoración de los principales aspectos que influyen en el proceso de filtración e infiltración de agua en el macizo rocoso, y que a la vez forman parte de los aspectos que se deben considerar para seleccionar una tecnología para controlar el agua que afecta a una excavación subterránea.

Si está Usted de acuerdo con ofrecerme su valiosa ayuda, se necesita antes de consultarlo determinar su coeficiente de competencia en el tema, a los efectos de reforzar la validez del resultado de la consulta. Por esa razón, se necesita responda las siguientes preguntas de la forma más objetiva que le sea posible.

1. Marque con una cruz (X) en la tabla siguiente, el valor que se corresponde con el grado de conocimiento que usted posee sobre el tema “Aspectos a considerar seleccionar una tecnología para controlar el agua que afecta una obra subterránea” (considere la escala presentada ascendente, es decir, el conocimiento sobre el tema va creciendo desde 0 hasta 10).

Escala	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Grado de conocimiento											

2. Realice una autovaloración del grado de influencia que cada una de las fuentes que le presentamos a continuación ha tenido en su conocimiento y criterios sobre el tema presentado. Para ello marque con una cruz (X) según corresponda en A (alto), M (medio) y B (bajo).

Fuentes de argumentación	Grado de influencia de cada una de las fuentes		
	A (alto)	M (medio)	B (bajo)
Análisis teóricos realizados por usted			
La experiencia obtenida			
Trabajos de autores nacionales			
Trabajos de autores extranjeros			
Su propio conocimiento del estado del problema en el extranjero			
Su intuición			

Gracias por su colaboración

DATOS GENERALES DEL EXPERTO

- Nombre y apellidos:
- Centro de trabajo:
 - Producción y servicios -----
 - Centro docente -----
 - Centro de investigación -----
- Carrera (s) universitaria (s) cursada (s). -----
Escriba su (s) nombre (s) -----

- Título (s) de formación académica de postgrado obtenido (s):
 - Especialidad de postgrado -----
 - Maestría -----
 - Doctorado -----
- Años de experiencia docente -----
- Años de experiencia en producción -----
- Años de experiencia las investigaciones -----

Anexo II.3 Características de los expertos seleccionados.

Anexo II.3-(a)

Comportamiento de la aplicación del Coeficiente de Competencia

$$K = \frac{1}{2} (k_c + k_a), \quad \text{donde:}$$

k_c: coeficiente de conocimiento o información del experto acerca del problema. Se calcula a partir de la valoración ofrecida por el experto sobre su conocimiento de la problemática, expresada en una escala de 1 – 10, que se multiplica por 0.1.

k_a: coeficiente de argumentación del experto que se calcula a partir de los puntos obtenidos al sustituir las respuestas ofrecidas por el experto sobre una tabla patrón.

Tabla 1 Patrón para evaluar el coeficiente de argumentación

FUENTES DE ARGUMENTACIÓN	A (alto)	M (medio)	B (bajo)
Análisis teóricos realizados por usted.	0.3	0.2	0.1
Su experiencia obtenida.	0.5	0.4	0.2
Trabajos de autores nacionales.	0.05	0.04	0.03
Trabajos de autores extranjeros.	0.05	0.04	0.03
Su propio conocimiento del estado del problema en el extranjero.	0.05	0.04	0.03
Su intuición.	0.05	0.04	0.03

Tabla 2 Evaluación de los coeficientes de conocimientos y argumentación de los expertos.

	Expertos C_i							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
k _c	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
k _a	1	1	1	1	0,97	0,97	0,97	0,94
K	0,95	0,95	0,95	0,95	0,935	0,935	0,935	0,92
	Expertos							
	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	
k _c	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	
k _a	0,85	0,83	0,75	0,75	0,73	0,73	0,72	
K	0,83	0,815	0,725	0,725	0,715	0,715	0,71	

Tabla 3 Evaluación de la competitividad de los 15 expertos que enviaron sus encuestas.

Coefficiente de competitividad	0,71	0,72	0,81	0,83	0,92	0,93	0,95	Total
Cantidad de expertos	3	2	1	1	1	3	4	15
Valor medio K	0,84							

Anexo II.3-(b)

Tabla 1 Características técnico profesional de los expertos.

Calificación profesional			
Centro de trabajo	Cantidad	Descripción	Labor que realizan
Centro docente nacional	5	UO, ISMM, UPR	Docencia-investigación
Centro de investigación	2	RAUDAL-Holguín	Investigación-producción
Producción y servicio	5	ENIA-Holguín	Producción
Centro Docente en el Extranjero	3	Oviedo , Salamanca	Docencia-Investigación
Total	15		15
Calificación profesional y académica			
Graduados universitarios	Especialidad de postgrado	Maestría	Doctor en Ciencias
5	1	1	8
Años de experiencia			
Rangos	Docencia-investigación	Producción	Investigación-producción
1 – 5 años		1	
6 – 10 años			
11 – 15 años	3		2
16 – 20 años	1	4	
21 – 25 años	4		
Más de 26 años			
Sub-Total	8	5	2
Total		15	

Anexo II.4 Resultados de la primera ronda de Delphi.

Primera ronda de Delphi para buscar consenso de criterios

<u>Factores influyentes o condicionantes.</u>			Votación de los expertos M(i) por criterios P(j)		
			Filtración	No	Control del agua
Características antrópicas y naturales	<i>Naturales.</i>	Vegetación.	9	1	4
		Compactación.	12	2	0
		Pendiente.	12	3	9
	<i>Antrópicos.</i>	Industriales.	0	4	1
		Urbanísticos	0	5	1
Características del macizo rocoso	<i>Características</i>	Litología.	12	6	12
		Composición mineralógica.	0	7	11
		Plegamientos	9	8	5
		Fallas	12	9	11
		Estratificación	12	10	11
		Características del agrietamiento	12	11	12
		Porosidad	12	12	11
	<i>Propiedades</i>	Propiedades físico-mecánicas	10	13	12
Estado tensional		8	14	6	
Características sísmicas			8	15	10
Caract. hidrográfica	<i>Régimen de lluvia.</i>		12	16	11
	<i>Presencia de ríos y arroyos.</i>		9	17	12
	<i>Presencia de embalses.</i>		9	18	11
Régimen hidrogeológico	<i>Construcción en estratos no saturados.</i>	Lámina de infiltración	12	19	12
		Coef. de infiltración	12	20	12
		Caudal de flujo de filtración	12	21	12
	<i>Construcción en estratos saturados.</i>	Coef. de filtración	12	22	12
		Caudal de flujo de filtración	12	23	12
Características de la excavación	<i>Profundidad de ubicación.</i>		12	24	12
	<i>Forma y dimensiones de la excavación.</i>		0	25	7
	<i>Destino y vida útil de la excavación.</i>		0	26	11
	<i>Método de excavación.</i>		8	27	6
	<i>Tipo de sostenimiento y/o fortificación</i>		4	28	10

Anexo II.5 Resultados del procesamiento de la segunda ronda de Delphi.

Anexo II.5(a) Resultados de la valoración de los factores que influyen en el proceso de filtración

M=12	Proceso de Filtración												P=22 criterios											
	1	2	3	6	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	27		
Experto 1	1	2	3	5	2	2	1	4	3	2	2	1	2	2	4	5	3	5	4	3	3			
Experto 2	3	2	3	4	2	4	3	5	3	0	0	5	5	5	5	5	5	5	5	4	2			
Experto 3	4	2	2	5	5	3	5	5	2	2	2	5	5	5	4	5	5	5	4	4	3			
Experto 4	3	2	3	5	2	2	3	5	5	3	2	3	3	3	3	4	5	5	5	3	2			
Experto 5	2	2	3	5	2	2	3	5	3	3	2	4	4	4	4	5	4	5	4	3	3			
Experto 6	1	2	3	5	2	2	3	5	5	2	1	1	4	3	3	4	5	5	5	3	0			
Experto 7	3	2	3	5	2	2	3	5	3	2	3	4	4	4	4	5	5	5	5	3	0			
Experto 8	3	2	3	4	2	2	3	5	3	2	2	3	3	3	3	4	5	5	5	3	0			
Experto 9	3	2	3	5	2	4	2	5	5	2	2	2	3	3	3	4	5	5	5	3	0			
Experto 10	0	3	2	3	0	4	3	5	5	2	0	0	3	0	0	4	5	5	5	3	4			
Experto 11	0	2	3	5	0	2	3	5	5	0	0	0	3	0	0	4	5	5	5	3	5			
Experto 12	0	2	3	4	0	2	3	5	5	0	0	0	3	0	0	4	5	5	5	3	5			
Frecuencia	0,38	0,42	0,57	0,92	0,35	0,55	0,55	0,98	0,98	0,42	0,28	0,27	0,68	0,53	0,53	0,82	1,00	0,95	1,00	0,95	0,63	0,45		
DesvSst	1,44	0,289	0,39	0,67	1,357	1,14	0,62	0,29	0,29	1,08	1,16	1,07	1,08	1,83	1,826	0,29	0	0,62	0	0,45	0,39	1,91		
Varianza σ^2	2,08	0,08	0,15	0,45	1,84	1,30	0,39	0,08	0,08	1,17	1,36	1,15	1,17	3,33	3,33	0,08	0,00	0,39	0,00	0,20	0,15	3,66		

Anexo II.5(b) Resultados de la valoración de los factores que influyen en el proceso de control de las filtraciones

M=12	Control del agua												P=23 criterios											
	3	6	7	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	
Experto 1	4	5	4	3	1	4	3	3	3	2	4	2	2	5	5	5	5	3	2	3	0	4		
Experto 2	3	3	3	4	2	5	4	2	2	5	3	3	3	4	5	5	5	4	1	3	2	3		
Experto 3	2	2	3	2	0	5	5	1	1	2	2	2	2	2	5	5	5	2	0	2	3	0		
Experto 4	2	3	2	3	2	4	5	2	1	3	3	3	2	5	5	5	5	3	1	0	3	1		
Experto 5	2	3	0	2	2	5	4	3	2	3	4	3	3	2	5	4	5	4	3	0	2	0		
Experto 6	1	5	3	3	2	4	4	3	0	4	3	3	3	3	4	5	4	5	4	0	3	0		
Experto 7	2	3	2	0	2	4	2	4	0	3	3	3	3	4	5	5	5	3	2	1	0	2		
Experto 8	1	2	1	3	1	4	2	3	2	3	2	2	2	4	4	5	4	5	3	3	0	3		
Experto 9	2	3	3	3	2	4	3	3	0	2	2	2	2	4	5	5	5	5	0	2	0	1		
Experto 10	0	3	2	4	2	4	3	2	0	1	2	3	3	4	5	5	5	4	2	3	0	3		
Experto 11	0	5	3	4	2	4	1	3	0	0	2	1	1	3	4	5	4	5	2	0	3	2		
Experto 12	0	4	3	5	1	5	0	3	0	0	0	0	2	0	3	5	4	5	3	3	3	5		
Frecuencia	0,32	0,68	0,48	0,60	0,32	0,87	0,63	0,57	0,18	0,42	0,53	0,48	0,43	0,72	0,95	0,97	0,95	0,97	0,65	0,23	0,47	0,25	0,45	
DesvSst	1,24	1,08	1,08	1,28	0,67	0,49	1,64	0,83	1,08	1,24	1,3	0,67	0,937	1	0,45	0,39	0,45	0,39	0,87	1,19	0,98	1,36	1,66	
Varianza σ^2	1,54	1,17	1,17	1,64	0,45	0,24	2,70	0,70	1,17	1,54	1,70	0,45	0,88	0,99	0,20	0,15	0,20	0,15	0,75	1,42	0,97	1,84	2,75	

Se decide eliminar los criterios cuya frecuencia es menor que 40 %

Anexo II.6 Resultados de la evaluación en la tercera ronda de Delphi.

Anexo II.6 (a) Factores que influyen en proceso de filtraciones de agua sometidos y evaluado en la tercera ronda.

<u>Factores que influyen en el proceso filtración de agua.</u>		No	Experto 1	Experto 2	Experto 3	Experto 4	Experto 5	Experto 6	Experto 7	Experto 8	Experto 9	Experto 10	Experto 11	Experto 12
Características del terreno	Naturales	1	6	5	6	6	6	3,5	5,5	5	8	8	8	5,5
		2	6	5	6	4	6	3,5	4	5	7	7	7	5,5
		3	14	11	11	13	11	8,5	12,5	11	14	13	13	11
		4	4	3	4	3	4	4	3	3	5	5	5	5
Características del macizo rocoso	Características	5	13	10	12	13	10	8,5	12,5	10	13	14	14	10
		6	3	3	3	3	3	2,5	2,5	2,5	2	2	2	2,5
		7	3	3	3	3	3	2,5	2,5	2,5	3	3	3	2,5
		8	12	9	10	7	9	8	7	9	12	12	12	9
Caract. hidrográfica	Propiedades	9	7	6	8	6	6	5	5,5	6	4	4	4	6
		10	10	8	9	12	9	7,5	11,5	7,5	9	11	11	7,5
		11	10	8	9	12	9	7,5	11,5	7,5	10	10	10	7,5
		12	8	5	8	6	3	3	6	5	6	6	6	4
Régimen hidrogeológico	Construcción en estratos no saturados.	13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Construcción en estratos saturados.	14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Características de la excavación	Profundidad de ubicación.	15	11	8	9	10	7	6	10	8	11	9	9	8
	Método de excavación.	16	14	12	13	14	12	9	13	12	15	15	15	12

Anexo II.6(b) Factores que influyen en proceso de control de las filtraciones sometidos y evaluado en la tercera ronda.

<u>Factores que influyen en el proceso de control de las filtraciones...</u>		No	Experto1	Experto2	Experto3	Experto4	Experto5	Experto6	Experto7	Experto8	Experto9	Experto10	Experto11	Experto12	
Características del macizo rocoso	Litología	1	13	10	10	11	13	13	13	11	13	13	13	13	
		Composición mineralógica	2	12	9,5	11	12	12	12	12	10	12	9,5	12	12
	Características	Fallas	3	5	6	5	4	6	6	8	6	5	6	6	5
		Características del agrietamiento	4	2,5	2,5	3	2,5	2,5	2,5	2,5	3	2,5	3,5	2,5	2,5
	Porosidad	5	2,5	2,5	4	2,5	2,5	2,5	2,5	4	2,5	3,5	2,5	2,5	2,5
Características sísmicas	Propiedades físico-mecánicas	6	11	11	9	5	11	10	11	9	11	11,5	10	11	
		7	10	12	12	10	10	11	10	12	10	11,5	11	10	
Caract. hidrográfica	Régimen de lluvia.	8	4	5	6	6,5	4	5	4	5	4	5	5	4	
	Presencia de ríos y arroyos.	9	8,5	7,5	7	8	8,5	8	5,5	7	8,5	7,5	8	8,5	
	Presencia de embalses.	10	8,5	7,5	8	9	8,5	9	5,5	8	8,5	7,5	9	8,5	
Régimen hidrogeológico	Lámina de infiltración	11	6	4	2	6,5	5	4	7	2	6	2	4	6	
	Coef. de infiltración	12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Características de la excavación	Coef. de filtración	13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Profundidad de ubicación.	14	7	13	13	13	7	7	9	13	7	9,5	7	7	
	Forma y dimensiones de la excavación.	15	16	15,5	15	16	16	16	16	16	16	15,5	16	16	
	Destino y vida útil de la excavación.	16	15	14	14	15	14	14	14	15	14	15	14	15	
Tipo de sostenimiento y/o fortificación	17	14	15,5	16	14	14	15	15	14	15	14	14	15	14	

Anexo III.1: Mapa conceptual sintético representativo de la escala de susceptibilidad

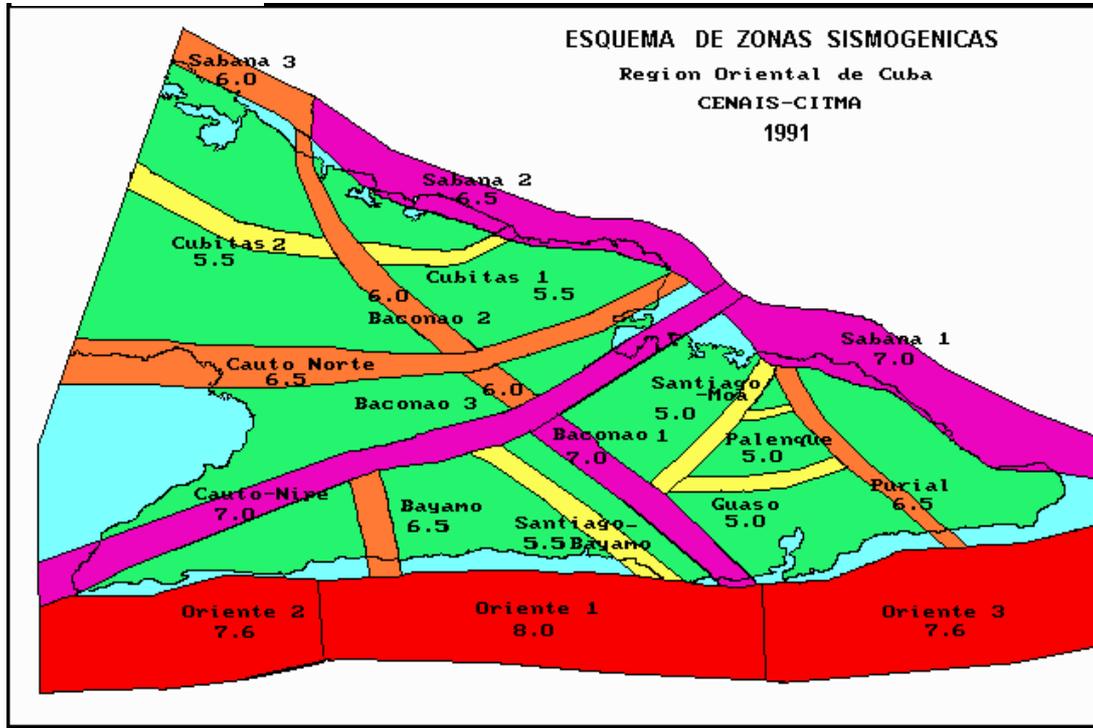
<p>Rocas muy permeables, $k > 100$ m/día, el espaciamiento entre grietas debe ser menor de 20 mm aunque en determinados casos puede llegar a 100 mm, la pendiente de la superficie (i) varía entre 0 y 3%, la situación más crítica es cuando existen zonas de acumulación de agua (vaguada)</p>	<p>Rocas permeables agrietadas, k 1-10 m/día. Zona de agrietamiento medio con espaciamiento entre 100 y 200 mm. Pendiente de la superficie varía entre 3 y 5 % o superior.</p>
<p>Rocas fuertes permeables con $10 < k < 100$ m/día, zonas de pendientes (i) entre 0 y 3% o zonas de acumulación de agua, el agrietamiento varía entre 20 y 100 aunque en ocasiones el espaciamiento entre grietas puede llegar a 200 mm. También se evalúan en esta categoría las zonas cuya permeabilidad es $k > 100$ m/día pero la pendiente de la superficie varía entre 3 y 5% o superior.</p>	<p>Rocas de poco permeables a prácticamente impermeables, k 0,01 -1 m/día. Zona poco agrietada, espaciamiento > 500 mm y zonas con pendiente (i) > 3%</p>

Anexo III.2 Grupos litoestructurales.

Grupos litoestructurales propuestos por Nicholson y Hencher, 1997 tomado de (Suárez Díaz, 1998)

Grupo lito-estructural		Tipo de roca	Característica
1	Roca fuerte masiva	Granito, Gabro, Dolerita, Basalto, Riolita, Metacuarcita, Neiss, Caliza y Mármol.	Resistente a la mayoría de los procesos de deterioro de masas de roca, aunque pueden ser más susceptibles a la meteorización. Puede ocurrir desintegración localizada alrededor de las discontinuidades mayores, conduciendo a caída de bloques. La caída de granos ocurre en las rocas algo débiles.
2	Roca fuerte discontinua	Arenisca con uniones de sílica y conglomerados, ortocuarcita, piroclásticos, calizas, dolomitas, mármoles y rocas ígneas fisuradas.	Susceptible a varios modos de deterioro dependiendo del sistema de fracturas. La caída de rocas y desmoronamiento del techo; en ocasiones pueden aparecer caída de bloques y placas de rocas relacionadas con el buzamiento y rumbo del agrietamiento.
3	Roca compuesta	Intercalaciones de estratos duros y blandos, rocas bandeadas o con intrusiones ígneas.	Susceptibles a meteorización diferencial que conduce al colapso del techo con caída de bloques y de rocas asociados.
4	Roca debilitada tectónicamente	Roca fallada o bandeada con fracturas y zonas de brechas.	Zonas trituradas o cortadas y altamente fracturadas, susceptibles a colapso, desmoronamiento, caída de rocas y bloques.
5	Roca débil granular	Arenisca friable, arcillolita, arenisca o conglomerado con uniones de yeso, arcilla o calcio, margas y calizas débiles.	Susceptible a meteorización del material y debilitamiento que conduce a la formación de láminas, caída de granos, lavado de granos y ocasionalmente colapso y caída de bloques. La fragmentación se puede asociar con la penetración de elementos extraños por las fisuras.
6	Roca kárstica	Calizas generalmente, duras.	Susceptible a la formación de cavidades de disolución y colapso. Generalmente aparecen masas discontinuas de roca dura que son susceptibles a desmoronamientos y caída de roca que puede acelerarse por la actividad de disolución. Se pueden desarrollar diversos tipos de formas Kársticas.
7	Roca anisotrópica	Lutitas, pizarras, filitas y esquistos con estructura laminar.	Susceptible a la formación de cáscaras y láminas que pueden colapsar. También son susceptibles al lavado superficial y proceso de erosión.
8	Roca con apariencia de suelo	Yeso (Chalk), margas, areniscas muy débiles, roca altamente meteorizada y suelo residual.	Susceptible a procesos de erosión, surcos y cárcavas. El deterioro primario ocurre por lavado superficial y caída de granos con flujos de detritos y colapso como modos secundarios.

Anexo IV Distribución de la actividad sísmica en la zona oriental



Esquema de zonas sismogénicas de la región Oriental de Cuba (Comisión, 1991).

Anexo IV.1 Propiedades de las rocas del túnel Serones –Salida Guaró.

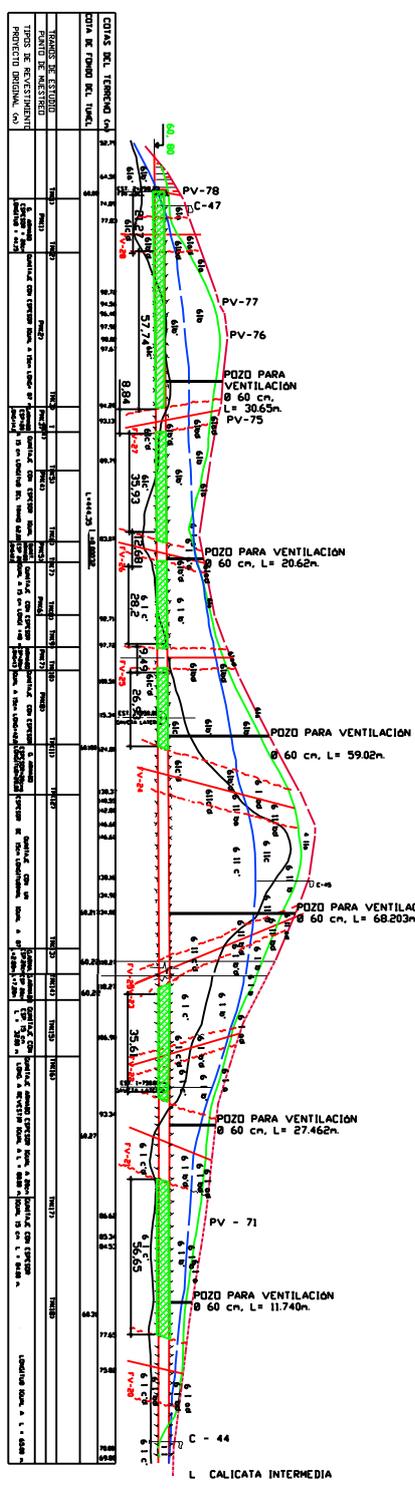
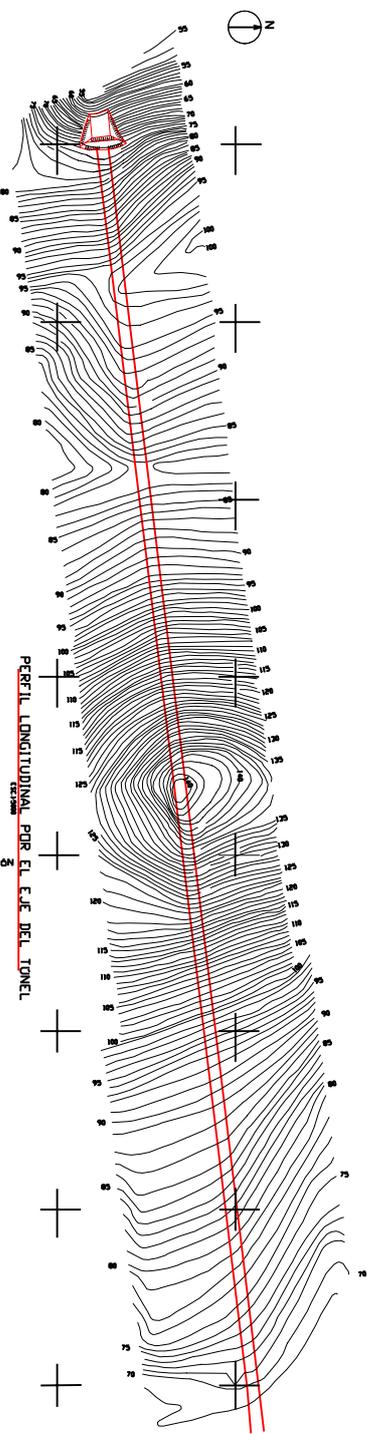
Anexo IV.1 a)

Zonas	Punto	Tipo de roca	Rc (Kg/cm ²)	N ^{re} de Ensayos	Rt (Kg/cm ²)	N ^{re} de Ensayos	Kt de Reblandecimiento
A	1	Gabro alterado	234,62	10	70,39	24	0.85
E	2	Gabro sano poco grietado	305,74	10	91,72	24	0.92
B	3	Gabro muy triturado Con zonas de brechas	182,31	10	54,69	24	0.57
F	4	Gabro sano poco grietado	284,10	12	85,23	24	0.86

Continuación **Anexo IV.1 a)**

Zonas	Punto	Tipo de roca	Rc (Kg/cm ²)	N ^{re} de Ensayos	Rt (Kg/cm ²)	N ^{re} de Ensayos	Kt de Reblandecimiento
C	5	Gabro muy triturado Con zonas de brechas	174,39	12	52,32	24	0.48
G	6	Gabro sano poco grietado	217,90	10	65,37	18	0.81.
D	7	Gabro muy triturado Con zonas de brechas	196,33	10	58,90	24	0.55

Anexo IV.2 Plano general de túnel Serones-Salida Guaró



LEYENDA

- LIMITE ENTRE CAPAS
- NIVEL FREÁTICO (DICI 1990 - JUNIO 1991)
- MONUMENTO TOPOGRÁFICO
- CALA CON SU NOMBRE Y ANCHURAS
- CALAS EN EL CARTE
- PUNTO DE MUESTREO
- PUNTO PARA DIVIDIR LOS TANDOS DE ESTUDIO
- ROCAS MUY HETERORIZADAS
- ROCAS HETERORIZADAS
- ROCAS POCO HETERORIZADAS Y FRESCAS
- ROCAS EN ZONAS DE FALLAS
- ROCAS POR DEBAJO DEL NIVEL FREÁTICO O SUPERSTICIALES
- FALLAS TECTÓNICAS u SUPERSTICIALES
- LIMITE DE LAS ZONAS AFECTADAS POR LAS FALLAS

- ARENOSAS CON CLASTOS CARBONÍFIDOS Y ARGILACEAS DE ALTA RESISTENCIA CARBONÍFIDAS CON CONCRETIONES DE SILICIO
- ARENOSAS Y ARGILACEAS DE ALTA RESISTENCIA CARBONÍFIDAS Y DIATOMACEAS

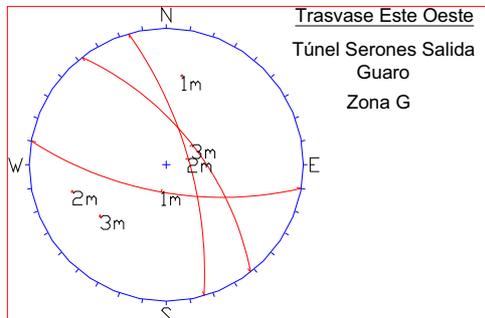
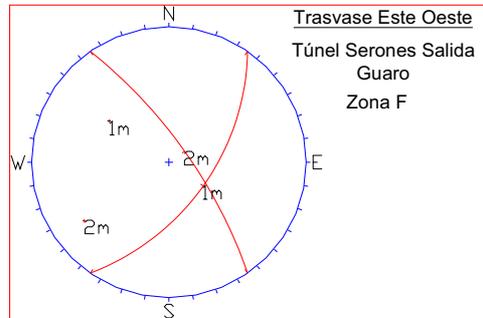
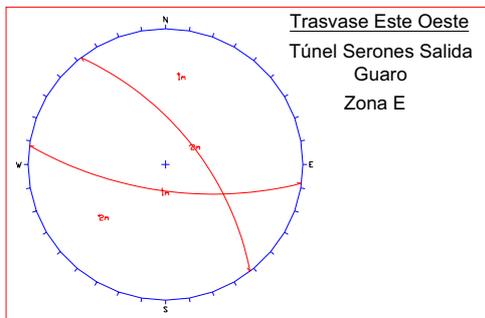
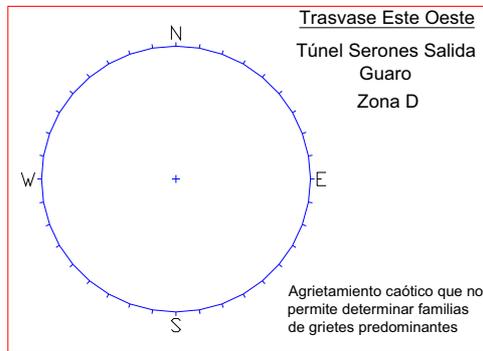
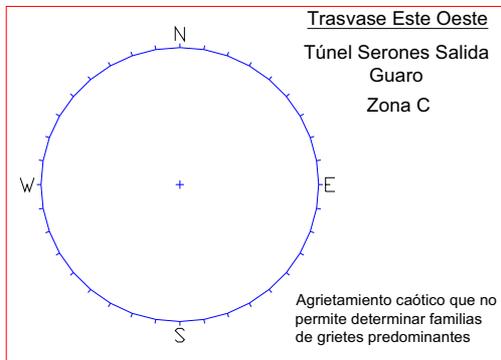
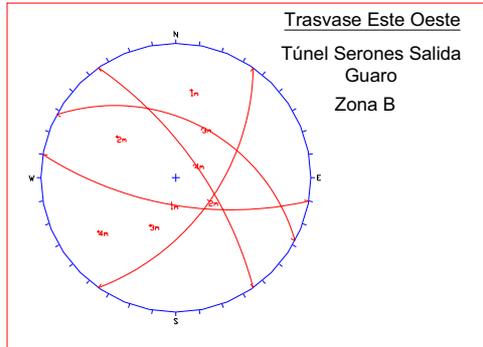
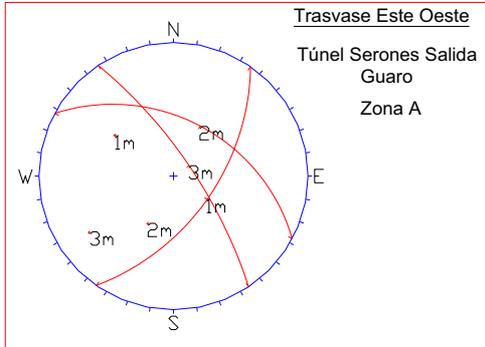
ISMN		Estrato de Edificación	
Modelo	Material	Forma	Textura
Modelo por 3. Típic			
Modelo por 4. Clásico			
Modelo por 5. Clásico			
Modelo por 6. Clásico			
Modelo por 7. Clásico			
Modelo por 8. Clásico			
Modelo por 9. Clásico			
Modelo por 10. Clásico			
Modelo por 11. Clásico			
Modelo por 12. Clásico			
Modelo por 13. Clásico			
Modelo por 14. Clásico			
Modelo por 15. Clásico			
Modelo por 16. Clásico			
Modelo por 17. Clásico			
Modelo por 18. Clásico			
Modelo por 19. Clásico			
Modelo por 20. Clásico			

Anexo IV.3a) Características del agrietamiento.

Tabla de las características del agrietamiento en el túnel Serones Salida Guaro

Zonas	Tramos	Familia	Rugosidad	Abertura	Espaciamiento	Tipo de relleno	Grietas por metros.
A	TM(1-2) 81,40 metros	3	Planas y lisas y rugosa	Abierta a moderadamente abierta	Cerrado a moderado	carbonato de calcio	6, 8, 12
E	TM(2-3) 63,73 metros	2	Planas y rugosas	Parcialmente abiertas y abiertas	Moderado	carbonato de calcio y arcilla	5 a 8
B	TM(3-5) 171,1 metros	Agrieta miento caótico	Planas y lisas	Abierta y moderadamente abierta	Cerrado	carbonato de calcio, detritos de rocas y arcilla	15 a 18
F	TM(5-6) 111,71 metros	2	Planas y lisas y rugosa	Abierta a moderadamente abierta	Moderado a espaciado	carbonato de calcio	4 a 8
C	TM(6-7) 89,88 metros	Agrieta miento caótico	Planas y lisas	Abierta a moderadamente abierta	Cerrado	carbonato de calcio, detritos de rocas	10 -12, 20
G	TM(7-9) 160,84 metros	3	Planas y lisas	Abierta a moderadamente abierta	Moderado	carbonato de calcio detritos de rocas	3 a 5
D	TM(9-10) 71,6 metros	Agrieta miento caótico	Planas y lisas	Abierta a moderadamente abierta	Cerrado	carbonato de calcio, detritos de rocas	10, 8, 12, 16

Anexo IV.3b) Representación estereográfica de los sistemas de grietas en las zonas estudiadas.



Anexo IV.4 Resultados del coeficiente de filtración obtenidos analíticamente.

Valores del Coeficiente de filtración obtenidos analíticamente, por la expresión de Hoek y Bray 1977

Tramo	Gravedad (m/seg ²)	Abertura mm	Viscosidad cm ² /seg	Espaciamento; mm	K m/seg
A	9,8	2,5	0,0101	6	1,24E-03
		10		12	9,90E-03
E		0,5		5,0	2,06E-04
		2,5		8,0	1,65E-03
B		10		15	1,24E-02
		10		18	1,48E-02
F		2		4	6,60E-04
		10		8	6,60E-03
C		2		10	1,65E-03
		10		20	1,65E-02
G	0,5	3	1,24E-04		
	2,5	5	1,03E-03		
D	2	8	1,32E-03		
	10	16	1,32E-02		