

Delimitación de zonas susceptibles a filtraciones en el túnel Serones-Salida Guaro del Traslase Este-Oeste

Armando Cuesta Recio¹ acuesta@ismm.edu.cu
Yuri Almaguer Carmonate¹ yalmaguer@ismm.edu.cu
José Otaño Noguel¹ joseot@ismm.edu.cu

Resumen

La existencia de flujos de agua subterránea en un macizo rocoso muy agrietado, unido a un relieve favorable al escurrimiento superficial, facilita la infiltración del agua hacia el interior de los túneles, laboreados al nivel del manto freático o por debajo de éste, en el Traslase Este-Oeste que se construye en la provincia de Holguín, Cuba. Como consecuencia, se producen inundaciones parciales y derrumbes por la pérdida de resistencia de las rocas o por el lavado del relleno de las grietas. Para adoptar medidas correctoras que aumenten la seguridad de las excavaciones y garanticen una mayor estabilidad de las obras es necesaria la delimitación de las áreas susceptibles a inundaciones y derrumbes por infiltración del agua. Mediante la combinación de métodos geomecánicos de análisis de macizos, estudios hidrogeológicos y cartografía digital se delimitaron, para el túnel Serones-Salida Guaro, cuatro zonas muy susceptibles por infiltración atendiendo a su alta permeabilidad (más de 10 m/día) y a su ubicación en la intersección de dos sistemas de fallas donde han ocurrido movimientos rumbo-deslizantes.

Palabras clave

Cartografía digital, excavaciones subterráneas, infiltración de agua, Traslase Este-Oeste, túneles.

Identification of sensitive areas to seepage in tunnel Serones–Salida Guaro, East-West Decantation

Abstract

The existence of underground water streams in a highly cracked rock mass in addition to a favorable relief for surface runoff facilitate water seepage into tunnels constructed at or below the level of the aquifer in the East-West Decantation which is being constructed in the province of Holguin (Cuba). This results in partial overflows and collapse due to lost resistance of rocks and washed crack fillings. To take corrective actions for enhanced safety during excavations and ensured stability of works, the areas which are sensitive to seepage were identified by combining geo-mechanical methods of mass analysis, hydro-geological surveys and digital mapping. The study revealed the presence of four highly sensitive areas to seepage in the tunnel Serones-Salida Guaro based on their high permeability (over 10 m/day) and location; which is at the intersection of two faults which have been subject to landslides.

Key words

Digital mapping, East-West Decantation, seepage, tunnels, underground excavations.

INTRODUCCIÓN

El Trasvase Este-Oeste es un complejo de túneles, canales y presas, que se ejecuta en la parte norte de las provincias orientales, con la finalidad de abastecer de agua a aquellas zonas históricamente afectadas por la sequía. Los túneles del trasvase generalmente se laborean al nivel del acuífero o por debajo de éste, en un macizo rocoso constituido en su mayor parte por rocas básicas y ultrabásicas, específicamente gabros, harzburgitas y peridotitas, con algunas intercalaciones de rocas de formaciones calcáreas (Trincado *et al.*, 2005).

El intenso agrietamiento y la presencia de varias fallas en el macizo facilitan la circulación de agua por el interior de éste, a la vez que la topografía del terreno favorece un abundante escurrimiento superficial. La combinación de ambas características en las áreas donde se laborean los túneles condiciona la existencia de zonas susceptibles a la inestabilidad por infiltración del agua y, unido a ello, la ocurrencia de inundaciones parciales y derrumbes, por la pérdida de resistencia de las rocas o por el lavado del relleno de las grietas.

En recorrido realizado en el túnel Serones-Salida Guaro se detectaron algunas zonas inestables, asociadas a la presencia del agua, que constituyen áreas de riesgo dentro del túnel. La delimitación de estas zonas susceptibles a la infiltración del agua en la traza del túnel, o en su área de influencia, permitiría la implementación de técnicas eficaces para el control de las afectaciones que por esta causa se produjeran en los túneles, de ahí la importancia de este trabajo.

Previo a la proyección y ejecución de las obras se realizaron investigaciones geológicas para caracterizar el macizo rocoso (Leyva & Cordovez, 2007; Leyva *et al.* (2007). Estos estudios, aunque se apoyaron en los Sistema de Información Geográfica (SIG) y otras herramientas cartográficas, centraron su atención en la estabilidad y la excavabilidad del macizo, pero no consideraron soluciones a corto ni a largo plazo para controlar los problemas relacionados con la circulación del agua.

Es conocido que una de las vías posibles para identificar las áreas susceptibles a la infiltración es la superposición de mapas temáticos y la confección de un Sistema de Información Geográfica (SIG). Lipponen *et al.* (2005) y Lipponen (2006), utilizando esta vía determinan, para el área de influencia de un túnel hidráulico, las zonas de riesgo y su magnitud, conjugando la acción del agua proveniente fundamentalmente de glaciales con otros aspectos como la morfología, las estructuras geológicas y la litología; como resultado, proponen algunos sistemas de sostenimiento y técnicas para el control de las filtraciones de agua.

Para aplicar en Cuba, de manera efectiva, la superposición de mapas temáticos con el fin de identificar zonas susceptibles por la presencia de agua en los túneles, habría que considerar, además del modelo digital del terreno (MDT) y los mapas tectónicos, litológicos y de hidroisohipsas (permeabilidad) otros mapas, como los hidrogeológicos, que contemplen la presión hidrostática, los de pendiente del terreno y los de direcciones de la escorrentías superficiales, atendiendo a que éstos reflejan condicionantes propias de zonas tropicales donde las precipitaciones juegan un rol importante en las filtraciones.

Esta investigación se propuso identificar, a través de la superposición de mapas temáticos (tectónicos, hidrogeológicos, topográficos), las zonas susceptibles a las infiltraciones, asociadas a la presencia del agua en el túnel Serones-Salida Guaro, con el fin de facilitar la toma de decisiones en pos de minimizar la incidencia negativa del agua en cualquiera de las etapas del proyecto de excavación.

Descripción general del túnel Serones–Salida Guaro

El túnel se ubica entre el arroyo Serones y el río Guaro. Tiene una longitud de 750 m, en dirección WNW-ESE y sección transversal ovoidal, altura de 5,90 m y ancho de 6,30 m; el arranque de la roca se realiza por perforación y voladura (Figura 1).

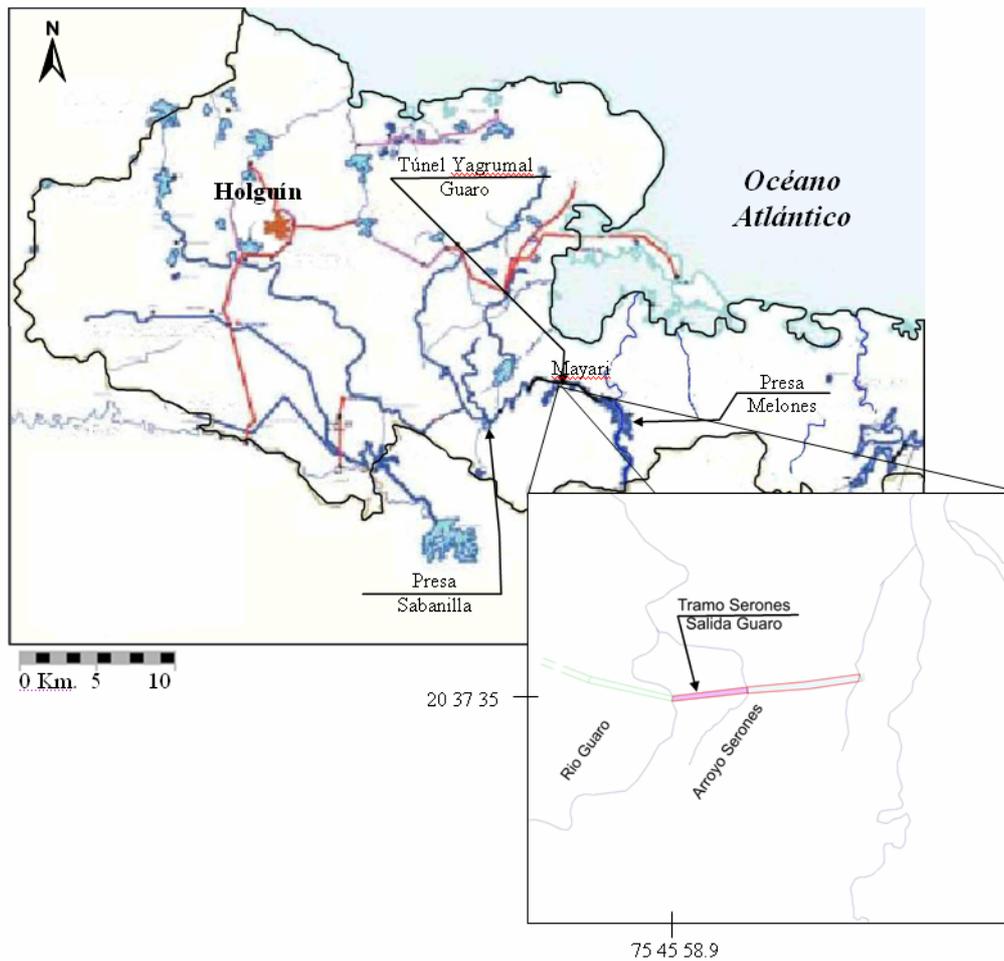


Figura 1. Esquema de la ubicación del tramo de estudio Serones-Salida Guaro.

El relieve del área es premontañoso, con elevaciones que llegan hasta 145 m sobre el nivel del mar y pendientes inferiores a 32° . Desde el punto de vista estructural, la traza del túnel es afectada por diez fallas. Las litologías predominantes son gabros y diabasas. En la Figura 2, tomada de Trincado *et al.* (2005), se representan los principales elementos tectónicos y la orografía en el perfil del túnel.

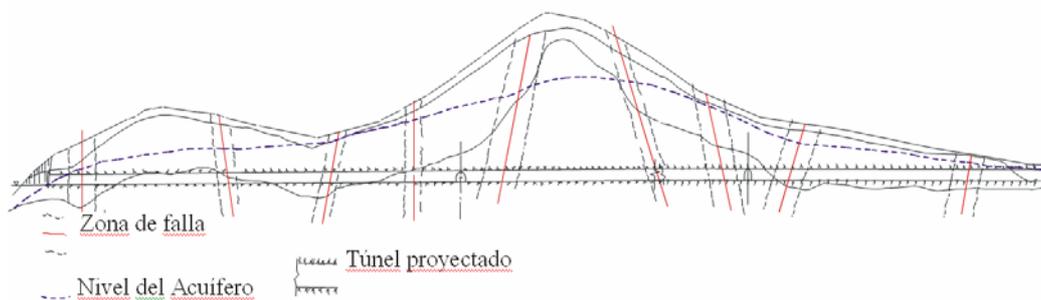


Figura 2. Esquema del perfil del túnel Serones-Salida Guaro, según Trincado *et al.*, 2005.

Las lluvias son abundantes en la región, con un acumulado anual promedio de 1 415 mm y un registro máximo mensual de 523,3 mm hasta el año 2007, según la Dirección de Cuencas Hidrográficas y el Servicio Hidrológico Nacional (2007). Existe un arroyo intermitente a 200 m de la boca Salida Guaro-Serones, cuyo cauce coincide con una falla de dirección SSE–NNW (Cruz *et al.*, 2005). El agua subterránea circula a través de las grietas, debido a que las rocas predominantes (gabros y diabasas) son fuertes y poco porosas y la permeabilidad varía desde 3,77 hasta 88,84 m/día (Trincado *et al.*, 2005).

MATERIAL Y MÉTODO

Para delimitar las zonas susceptibles a la inestabilidad por infiltración en el túnel, los métodos de análisis geomecánico de macizos rocosos RQD de Deere y J_v de Palmström (Palmström, 1982; Hoek, 2007), se combinaron con estudios hidrogeológicos básicos y con la cartografía digital. Primeramente, se determinaron las características orográficas, hidrográficas, hidrogeológicas y tectónicas del área, con el fin de identificar los rasgos morfológicos del relieve, como elevaciones, presencia de vaguadas y ríos.

Se utilizó un levantamiento topográfico, a escala 1: 1 000, del área de influencia del túnel para obtener el Modelo Digital del Terreno (MDT) del área bajo el cual se diseñó la obra. El MDT abarcó hasta 200 metros a ambos lados, en dirección perpendicular al eje de la excavación, con el fin de determinar los rasgos morfológicos alineados en el terreno que indican la presencia de discontinuidades en el macizo rocoso.

A partir de la rejilla creada con los datos del levantamiento topográfico y utilizando el método simplificado propuesto por Moore *et al.* (1993), se determinó la pendiente entre puntos y se generó el mapa de pendientes. Se confeccionó, además, un mapa de vectores a partir del gradiente entre puntos y mediante la aplicación de la primera derivada direccional a cada nodo del modelo digital (Schwartz, 1974), con el fin de obtener las direcciones preferenciales del movimiento de las aguas superficiales; para ello se utilizaron los módulos *Terrain Slope* y *Map Vector*, del Surfer, los que permiten obtener información sobre la divergencia y acumulación de flujos de aguas y la susceptibilidad a procesos erosivos.

Se realizaron también trabajos de campo para caracterizar las condiciones geomecánicas y estructurales del macizo rocoso, midiéndose así los elementos de yacencia de discontinuidades, como estratificación, agrietamiento, planos de fallas, zonas de cizalla; se utilizaron además datos de perforaciones geológicas correspondientes a investigaciones realizadas en el año 1991 por la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Holguín.

A partir de la información recopilada de los trabajos de campo y la digitalización de elementos tectónicos se generó el mapa tectónico, el diagrama de roseta y la representación estereográfica de las discontinuidades del terreno. Los mapas hidrogeológicos se crearon a partir de los datos de permeabilidad, nivel del acuífero y presión hidrostática de los flujos subterráneos, obtenidos en calas hidrogeológicas, mediante mediciones y ensayos a presión, o a partir del coeficiente de permeabilidad (k) en aquellos lugares donde no existían datos de perforaciones. El coeficiente (k) fue determinado por la expresión de Bear *et al.*, 1993.

$$k = \frac{e^3}{12 \cdot b}$$

Donde:

e : abertura de la grieta o junta, mm.

b : espaciamiento entre grietas. mm

Determinación de las zonas susceptibles

Para determinar las zonas susceptibles en el eje del túnel y su área de influencia se empleó el método heurístico, en el cual, a partir de la identificación de variables que inciden en los procesos de infiltración y control del agua, se realiza un análisis matricial de cada grupo clasificado (Leroi, 1996; Almaguer, 2005; Bonachea, 2006). Los factores y clases empleados se exponen en las Tablas 1-4.

Tabla 1. Características de la superficie (Matriz factor 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 zona de falla (Matriz factor B)

Clase	Descripción	Susceptibilidad
I	Rocas muy fuertes permeables $k > 100$	1
II	Rocas fuertes permeables $k 10-100$	0,75
II	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 la permeabilidad (k , m/día) (Matriz factor A1)

Clase	Descripción	Susceptibilidad
I	Rocas muy fuertes permeables $k > 100$	1
II	Rocas fuertes 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 4. Características del agrietamiento (Matriz factor B1)

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

A partir de la combinación cruzada de las matrices (Westen, 2004; Almaguer, 2005) se obtuvieron otras que caracterizan los factores ($A=[a_{ij}]$; $B=[b_{ij}]$) y ($A1=[a_{ij}]$; $B1=[b_{ij}]$), las cuales se combinan para obtener ($C1=(A1+B1)/2$ y $C=(A+B)/2$); finalmente se obtiene la matriz resultante, $Sv=(C+C1)/2$, la cual expresa los valores de susceptibilidad (Tabla 5).

Tabla 5. Matriz resultante (Sv).

Arietamiento y permeabilidad	Pendiente y presencia de fallas				
	1,000	0,853	0,708	0,563	0,500
	0,853	0,705	0,560	0,415	0,353
	0,708	0,560	0,415	0,270	0,208
	0,563	0,415	0,270	0,125	0,063
	0,500	0,353	0,208	0,063	0,000

Para elaborar la escala de susceptibilidad se consideró 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. A continuación aparece la escala de susceptibilidad (Tabla 6).

Tabla 6. Escala de susceptibilidad.

Color	Escala	Denominación
	$Sv > 0,7$	Zona muy susceptible
	$0,5 < Sv < 0,7$	Zona de susceptibilidad media
	$0,125 < Sv < 0,5$	Zona de poca susceptibilidad
	$Sv < 0,125$	Zona muy poca susceptibilidad

Superposición de mapas

Para la superposición de los mapas temáticos que contienen los principales factores condicionantes de susceptibilidad del túnel a fenómenos relacionados con la presencia de agua se procedió como se muestra en la Tabla 7. La existencia de una zona susceptible se define a partir de los factores dinámicos o activos.

Tabla 7. Orden en que se superponen los factores condicionantes de la susceptibilidad

<p>Factores pasivos</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Principales estructuras geológicas 2. Coeficiente de permeabilidad 3. Eje del túnel 	<p>Nota: Siempre que sea posible se presentará una vista en planta y de perfil en 3D.</p>
<p>Factores activos</p> <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. Cota del nivel del acuífero 	<p>Nota: Siempre que sea posible se presentará una vista en planta y de perfil en 3D.</p> <p>Nota: Cuando existe rocas estratificadas se presentará un perfil del eje del túnel.</p>

Delimitación de las zonas susceptibles y creación de buffers

Para delimitar las zonas de susceptibilidad se realizó en cada punto de documentación la misma operación efectuada entre las matrices, y el valor S_v obtenido para cada punto se representó en un mapa. Posteriormente, se trazaron las isolíneas atendiendo a los valores definidos en la escala de susceptibilidad. Este proceso se realizó de forma semi-automatizada con la ayuda de software especializado como Surfer y ArceView. Los atributos que definen cada zona se sintetizan en un mapa conceptual (Tabla 8).

Tabla 8. 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>

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Modelo Digital de Elevaciones (MDE)

Con el procesamiento e interpretación del MDE (Figura 3) se obtuvo la siguiente información:

- A) Las escorrentías superficiales con dirección ESE–WNW se alinean en los extremos del túnel y escurren en dirección N-S, lo cual genera condiciones de riesgo por inundación en los emboquilles de la excavación (B1 y B2).
- B) La vaguada (V), relacionada con el arroyo intermitente, acumula el agua proveniente de las zonas elevadas, encauzándola en dirección N-S. Esta vaguada constituye un indicio de falla que aumentaría los riesgos de infiltración de agua al conjunto macizo excavación y significaría un deterioro de las características mecánico-estructurales al retenerse el agua mayor tiempo en el lugar.

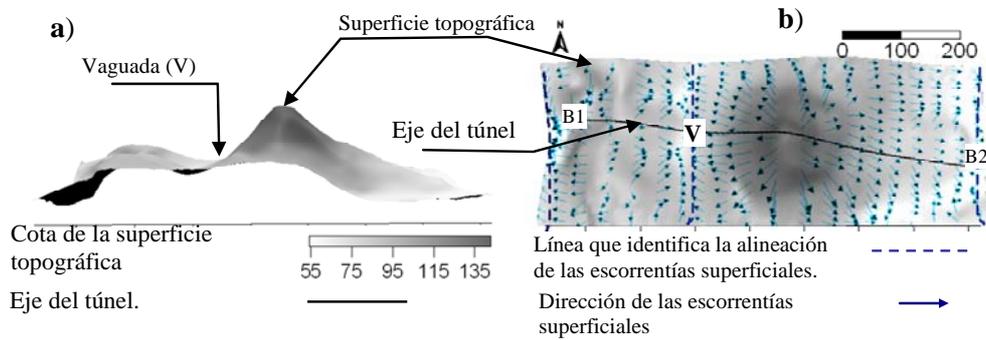


Figura 3. Modelo digital de elevaciones en el área del túnel Serones-Salida Guaro.

Tectónica

La digitalización de los datos tectónicos arrojó que existen 10 fallas que cortan al túnel y que el sistema de fallas con dirección NE-SW es posterior a los sistemas NW-SE, cortando estos últimos, lo que provoca zonas de intenso agrietamiento (Figura 4). A pesar de no existir evidencias de actividad neotectónica en las estructuras disyuntivas presentes en el área, sí existen de antiguos movimientos rumbodeslizantes en tres zonas, donde el sistema NE desplaza las estructuras NS, dos de estas zonas coinciden con sistemas de escorrentía superficial, por lo que se consideran de riesgo por filtraciones de agua.

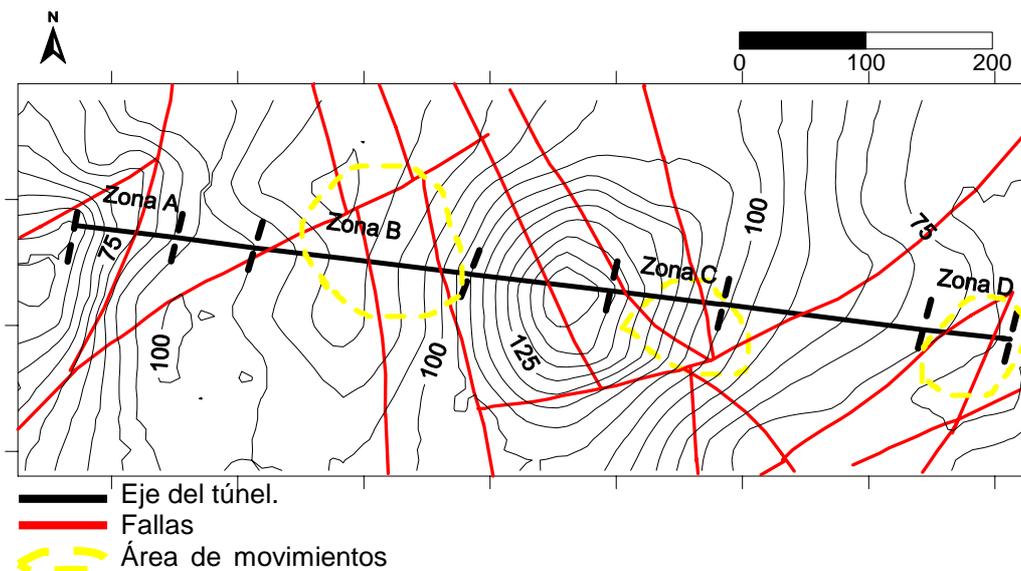


Figura 4. Distribución de las dislocaciones tectónicas en el área del túnel Serones-Salida Guaro.

En el diagrama de rosetas de la Figura 5 se observan las direcciones preferenciales de las fallas NW-SE y NE-SW. En la representación estereográfica se constata que las estructuras disyuntivas manifiestan buzamientos superiores a 45°, por lo que se clasifican de alto ángulo; este último aspecto se considera favorable con respecto al eje de la excavación, sin embargo, el agrietamiento es desfavorable en los tramos A; B; C; D, como se muestra en la Tabla 10.

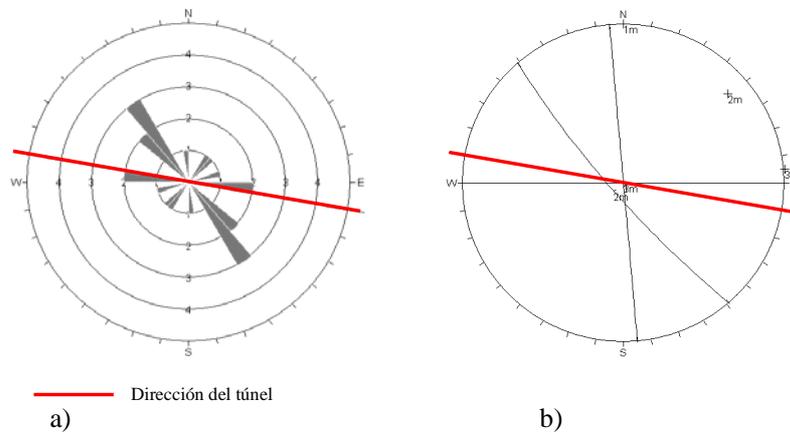


Figura 5. Diagrama de roseta (a) y representación estereográfica (b) de las fallas documentadas en el túnel Serones-Salida Guaro.

Tabla 10. Características del agrietamiento en el túnel Serones Salida Guaro

Zonas	Tramos	Familia de grietas	Rugosidad	Abertura	Espaciamiento	Tipo de relleno	Grietas por metros	(RQD %) Calidad del macizo
A	TM(1-2) 88,19 metros	3	Planas lisas y rugosa	Abierta a moderadamente abierta	Cerrado a moderado	carbonato de calcio	6, 8, 12	25 < RQD < 50
B	TM(3-5) 139,2 metros	Agrietamiento caótico	Planas y lisas	Abierta y moderadamente abierta	Cerrado	carbonato de calcio, detritos de rocas y arcilla	15 a 18	25 < RQD < 50
C	TM(6-7) 112,18 metros	Agrietamiento caótico	Planas y lisas	Abierta a moderadamente abierta	Cerrado	carbonato de calcio, detritos de rocas	10 -12, 20	25 < RQD < 50
D	TM(9-10) 85,9 metros	Agrietamiento caótico	Planas y lisas	Abierta a moderadamente abierta	Cerrado	carbonato de calcio, detritos de rocas	10, 8, 12, 16	25 < RQD < 50

En la Figura 6 puede observarse la coincidencia de zonas de mayor permeabilidad con zonas de fallas donde, además, en superficie se alinean las escorrentías superficiales.

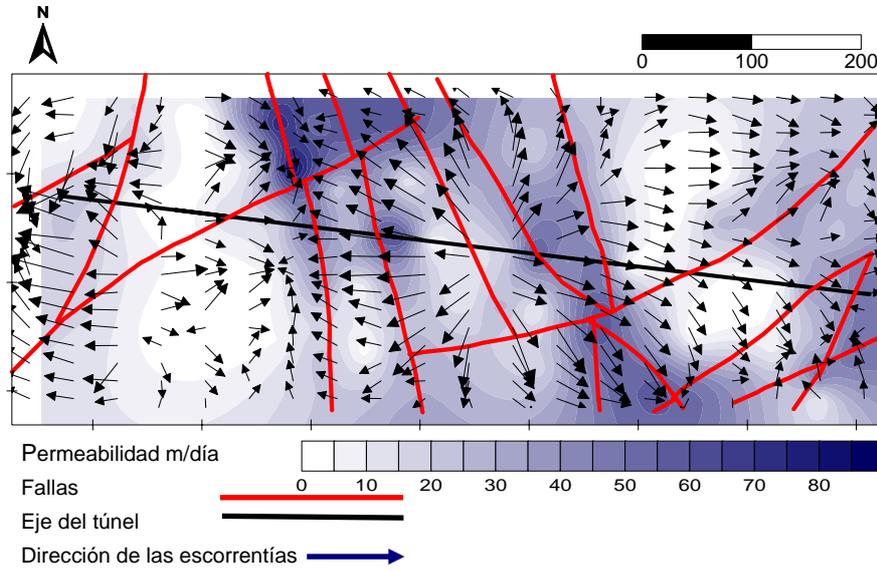


Figura 6. Comportamiento del coeficiente de permeabilidad en el área del túnel.

Uno de los problemas relacionados con las filtraciones está condicionado por la posición relativa del nivel del acuífero y la cota de la excavación antes de iniciar el laboreo del túnel. En la Figura 7 se observa que la mayor parte del túnel se encuentra por debajo del nivel acuífero, lo cual favorece la infiltración del agua a la excavación, el aumento de la presión de poros y, consecuentemente, el desprendimiento de bloques delimitados por planos de grietas.

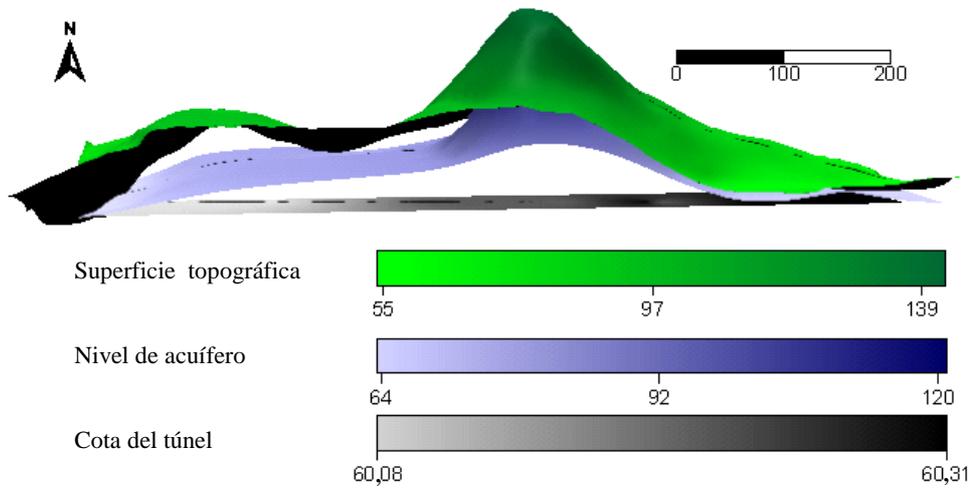


Figura 7. Ubicación del nivel del acuífero por encima de la cota del túnel Serones-Salida Guaro, en la etapa de proyecto.

Zonas susceptibles

En la Figura 8 se observan las zonas demarcadas a partir de los valores obtenidos de las operaciones con las matrices de los factores condicionantes. Las dimensiones de los buffers demarcados sobre el eje del túnel responden a valores de permeabilidad entre 10 y 100 m/día y a un agrietamiento que varía de cerrado a moderado.

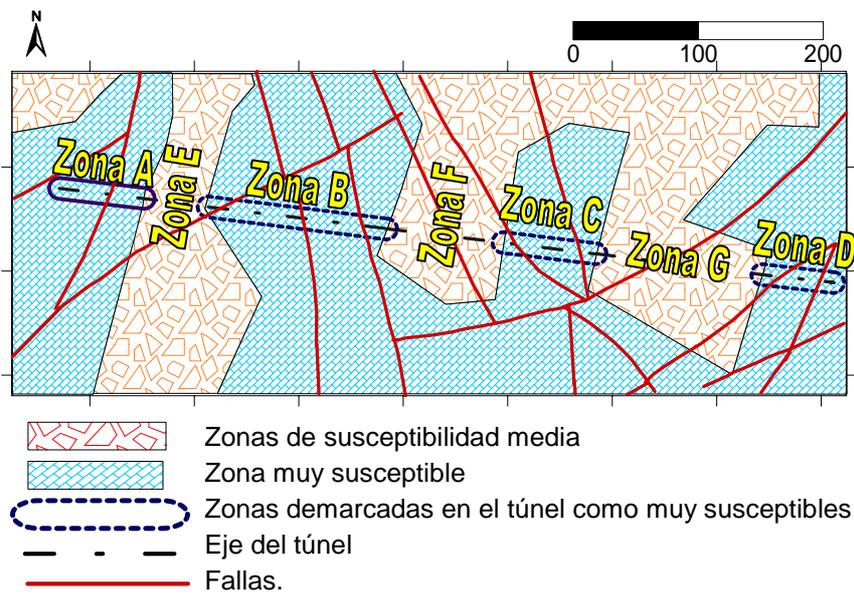


Figura 8. Zonificación de áreas susceptibles por la presencia de agua.

Imágenes fotográficas de la entrada del túnel (Figura 9) muestran el grado de trituración y deterioro de la roca en la boca del mismo, que corresponde a la Zona D, donde se realizó 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 las rocas, favoreciendo el proceso de filtración y provoca desprendimiento de bloques, corroborando así los resultados obtenidos de la combinación de mapas temáticos.



Figura 9. Influencia de las estructura geológica en la estabilidad del emboquille, la flecha señala el plano de falla.

CONCLUSIONES

Combinando los factores condicionantes de la susceptibilidad a la inestabilidad, tales como la inundación y la pérdida de propiedades del conjunto macizo-excavación por la presencia de agua, determinados a partir de estudios del macizo rocoso y el procesamiento digital de la información, fue posible implementar un Sistema de Información Geográfica que permitió identificar cuatro zonas susceptibles por la acción combinada de las filtraciones de agua y los fenómenos geólogo-estructurales en el túnel Serones-Salida Guaro, lo que facilita la toma de decisiones para disminuir los riesgos por la presencia de agua en los proyectos de excavaciones de túneles hidráulicos.

REFERENCIAS

- ALMAGUER, Y. 2005. Evaluación de la susceptibilidad del terreno a la rotura por desarrollo de deslizamientos en el yacimiento Punta Gorda. [Instituto Superior Minero Metalúrgico]. Moa (Tesis doctoral) 96 p
- BEAR, J.; TSANG, C. & MARSILY, G. 1993. Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock. San Diego (Unpublished manuscript).
- BONACHEA, J. 2006. Desarrollo, aplicación y validación de procedimiento y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debido a procesos geomorfológicos. [Universidad de Cantabria]. Cantabria (Tesis doctoral) 280 p.

- CRUZ, C. T.; ROSA, A. P. D. L.; PEÑA, R. A. & CABRERA, J. E. C. 2005. Proyecto ingeniería básica y de detalle, Túnel Yagrupal Guaro. Memoria Descriptiva. Holguín: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos Holguín. Tomo I.
- DIRECCIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS & SERVICIO HIDROLÓGICO NACIONAL. 2007. Análisis de lluvias, embalses y acuíferos (nov 07). Acceso 20-Dec-2007, en <http://www2.hidro.cu:80/documentos/boletines/Bolnov07.pdf>
- HOEK, E. 2007. Practical Rock Engineering (on line). www.RocScience.com, en formato PDF [20-05-2008] 342 p.
- LEROI, E. 1996. En Landslide hazard-Risk maps at different scales: objectives, tools and developments. 7th. Int. Symp. on Landslides, Trondheim, Vol I: 35-51.
- LEYVA, C. & CORDOVEZ, J. 2007. Caracterización geomecánica del complejo ofiolítico usando las tecnologías de procesamientos de imágenes, el modelo digital del terreno y teledetección. VIII Taller Internacional Informática y Geociencias, Sociedad Cubana de Geología. La Habana, 20-23 marzo (Memorias), p 128 -136.
- LEYVA, C.; CORDOVEZ, J.; CARRALERO, N.; PÉREZ, L. & GARCÉS, A. 2007. Sistema de Investigación Ingeniero-Geológico Trasvase Este-Oeste Tramo Sagua-Melones. VIII Taller Internacional Informática y Geociencias, Sociedad Cubana de Geología. La Habana, 20-23 marzo (Memorias), p 21.
- LIPPONEN, A. 2006. Topographical, structural and geophysical characterization of fracture zones: implications for groundwater flow and vulnerability. In O. Heikinheimo, V.-M. Kerminen, J. Mattila & R. Laiho (Eds.), Monographs of the Boreal Environment Research: www.environment.fi/publications.
- LIPPONEN, A.; MANNINEN, S.; NIINI, H. & RANKA, E. 2005. Effect of water and geological factors on the long-term stability of fracture zones in the Päijänne Tunnel. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 42: 3-12.
- PALMSTRÖM, A. 1982. The volumetric joint count - a useful and simple measure of degree of rock mass jointing. IV Congress International Association Of Engineering Geology New Delhi, New Delhi.

- TRINCADO, C.; PÁREZ, A.; ALMENARES, R. & COBOS, J. 2005. Traspase Este–Oeste, túneles del tramo Melones-Sabanilla, túnel Yagrumal-Guaro. Holguín: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Holguín, p. 18.
- WESTEN, C. V. 2004. Uso de los SIG en el mapeo de deslizamientos (en línea) www.itc.nl [7-03-2009].