

XII Congreso Nacional de Geotecnia CONGEO 2015

Metodología de seguimiento postconstructivo de túneles en ambientes tropicales, caso práctico: Túnel Zurquí, Ruta Nacional No. 32, Costa Rica

Paulo Ruiz¹, Cristina Castanedo²(*), José F. Garro¹ & Roy Barrantes¹

1: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME-UCR),
Universidad de Costa Rica; paulo.ruizcubillo@ucr.ac.cr

2: Consultora Ingeniería Geológica / Instituto Costarricense de Electricidad (ICE),
ccastanedo@ice.go.cr

* Autor para contacto

RESUMEN

El túnel Zurquí, fue construido en los años ochenta del siglo pasado, es una estructura clave para la red vial nacional y el desarrollo económico del país. La determinación de su estado actual es necesaria para tomar las medidas pertinentes para su mantenimiento y extensión de su vida útil.

El túnel tiene una longitud de 592 m, un ancho y alto aproximados de 11 y 8 m respectivamente. Fue excavado en tobas, brechas volcánicas y diques andesíticos del grupo Zurquí. En la inspección realizada por LanammeUCR en octubre del 2014 se realizó un levantamiento de la geometría interna del túnel con un escáner lidar terrestre. Se evaluó visualmente toda la extensión de sus paredes y techos para realizar una clasificación de zonas con problemas según su importancia. Externamente, mediante imágenes lidar aéreas se realizó un análisis geomorfológico detallado y del sistema de drenaje sobre el Cerro Zurquí.

Con una plantilla previamente diseñada del túnel, se evaluaron aspectos como: humedad, estado de drenajes, salidas de agua, eflorescencia, sales y acumulación de precipitados, grietas en el concreto y acero expuesto. Además se realizaron mediciones del concreto lanzado con el martillo de Schmidt. Posteriormente, los datos se analizaron y clasificaron en cinco niveles de importancia.

Se generó un modelo tridimensional de más de 160 millones de puntos, que presentan un error promedio de 0,9 mm. Los principales problemas que se encontraron en el túnel son: infiltración de aguas, eflorescencia en las grietas del concreto de las paredes, acumulación de sedimentos y cunetas en pésimas condiciones.

Se quiere impulsar el mantenimiento adecuado de esta obra, definir los estándares de inspección y seguimiento para túneles, y en este caso en particular para un túnel carretero. De esta forma, salvaguardar la inversión realizada durante su construcción, reducir el gasto futuro y disminuir la vulnerabilidad del túnel ante eventos naturales que podrían afectarlo.

Post constructive follow up methodology for tunnels in tropical environments, the case of: Zurquí Tunnel National Route No. 32, Costa Rica

ABSTRACT

The Zurquí tunnel was build in the decade of the eighty's of the last century, it is a key structure of the national route network and for the economic develop of the country. Determining its current situation is necessary to make the appropriate maintenance programs and extend its lifetime.

The tunnel is 592 m long, 11 m width and 8 m high. It was excavated through tuffs, volcanic breccias and andesitic dikes from the Zurquí group. The inspection made by LanammeUCR in October 2014 included a terrestrial LIDAR survey to obtain the inside geometry of the tunnel. The walls and roof were inspected visually to make classification of the zones with problems base on its importance. A detail geomorphologic map and superficial drainage characterization was made using aerial LIDAR images from the Zurquí mountain.

Using a predesigned grid of the tunnel, the follow aspects were evaluated: humidity, gutters and drain system inside the tunnel, presence of efflorescence, salt and precipitates accumulation, cracks in the concrete and exposed iron. Measurements in the concrete were made using the Schmidt hammer. Subsequently the data was analyzed and classified in five levels of importance.

A LIDAR tridimensional model of the tunnel was made using 160 million points, with an error of 0.9 mm. The main problems that were found in the tunnel are: water infiltration, presence of efflorescence, several cracks in the concrete, sedimentation and gutters in poor conditions.

This work wants to promote proper maintenance of the tunnel, define inspection standards and follow up methodologies for tunnels, in this particular case a highway tunnel. Thus, protect future expenses and diminish the tunnel vulnerability to natural events that could affect it.

INTRODUCCIÓN

La evaluación e inspección de túneles carreteros después de su construcción es un proceso que se debería ejecutar periódicamente, cumpliendo con programas de mantenimiento y especialmente después de la ocurrencia de eventos sísmicos o atmosféricos extremos. Inspecciones periódicas que sigan una metodología que pueda ser enriquecida por diferentes grupos de trabajo y mejorada a través del tiempo, puede llevar a prevenir problemas y fallas importantes así como minimizar los costos en reparaciones mayores. En un país tropical y tectónicamente activo como Costa Rica estas evaluaciones podrían servir como una memoria histórica y técnica de la estructura para poder realizar comparaciones después de terremotos o eventos atmosféricos extremos.

La Ruta Nacional No. 32 (RN-32) fue construida en los años ochenta y comunica la parte central del país con el sector Caribe (Figura 1). Es una ruta de gran importancia para desenvolvimiento económico del país ya que por ella pasan gran cantidad de productos de importación y exportación. En esta ruta se encuentra el túnel Zurquí que fue objeto de la evaluación que se describe en este trabajo.

El túnel Zurquí, se encuentra ubicado en el kilómetro 20 de la RN-32 en el distrito de Jesús del cantón de Vásquez de Coronado, provincia de San José y dentro de los límites del Parque Nacional Braulio Carrillo. Es el único túnel del país que se utiliza actualmente en una Ruta Nacional. Presenta una longitud de 591,7 m, un ancho y alto aproximados de 11 y 8 m respectivamente. Su construcción se empezó a inicios de los años 80, y tuvo un costo de 190 millones de colones aproximadamente (Figura 1) (Municipalidad de Vásquez de Coronado 2014).

Debido a los materiales geológicos (rocas volcánicas) y las condiciones climáticas de la zona, la construcción de esta obra fue una labor muy compleja, por lo que representó un hito en la ingeniería geotécnica costarricense del siglo pasado. Sin embargo, en sus cerca de 30 años de servicio, el nivel de mantenimiento que ha recibido ha sido mínimo y de las evaluaciones que se le han realizado no existen registros documentados.

En octubre del 2014, se realizó una inspección del túnel Zurquí con funcionarios de la Unidades de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (UGERVN) y Puentes, del PITRA – LanammeUCR así como ingenieros geológicos expertos en túneles. En el presente trabajo se muestra detalladamente la metodología que se siguió en esa inspección y sus principales resultados. Con el objetivo de brindar a los geotecnistas del país y la región un insumo de las diferentes técnicas e instrumentos con que se cuenta en Costa Rica para el seguimiento postconstructivo de túneles en ambientes tropicales.

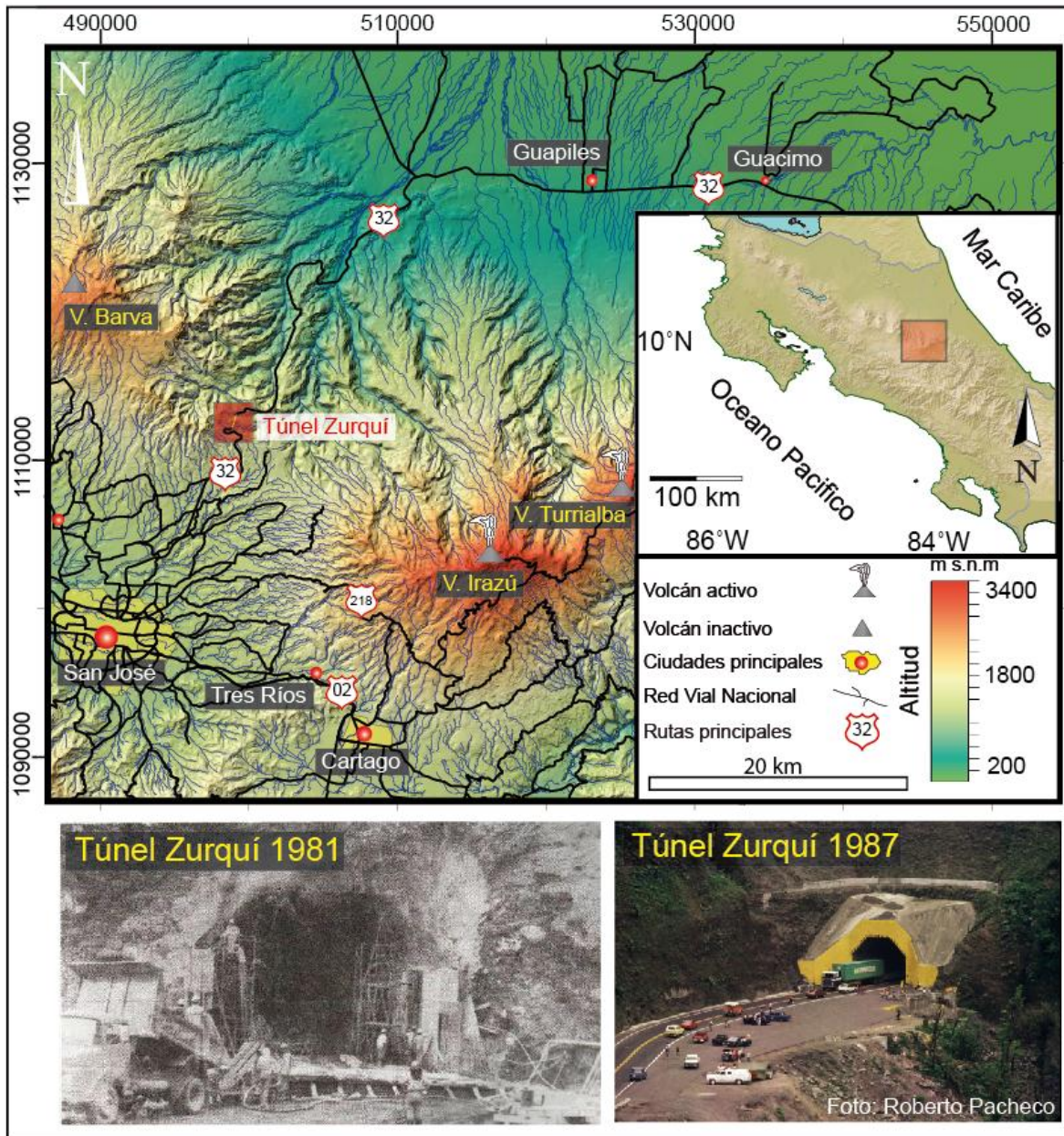


Figura 1. Ubicación de la Ruta Nacional No. 32 y el túnel Zurquí. En la parte inferior se muestran imágenes de la construcción del túnel en 1981 y la estructura ya terminada con la ruta funcionando.

Los resultados del presente trabajo tienen como objetivo que la Administración, a través de un ente especializado, realice el mantenimiento adecuado a esta obra tan importante para el país, de tal manera que se adecue a los estándares mínimos esperados para un túnel carretero de una Ruta Nacional. En concreto, se busca salvaguardar la inversión realizada, reduciendo el gasto en el tiempo y disminuyendo la vulnerabilidad del túnel ante eventos naturales que puedan afectarlo.

MÉTODOLÓGÍA

El trabajo se programó en dos etapas interrelacionadas, una de estudio y caracterización y la segunda, de toma de datos, análisis e interpretación (Figura 2).

Para la primera etapa, se siguió una metodología típica de recopilación de información, consulta de los informes técnicos que se elaboraron durante el proceso constructivo y análisis de información topográfica de la zona donde se ubica el túnel. Analizando esta información se generaron mapas geomorfológicos generales y detallados, mapas de susceptibilidad de deslizamientos y de interpretación de drenaje superficial.

La segunda etapa, consiste en un trabajo más metodológico e inusual. En base a los métodos disponibles consistió en: escaneo con un equipo líder para generar un modelo tridimensional del túnel, análisis de los deterioros y su severidad, realización de medidas con martillo Schmidt y empleo de cámara térmica. Más adelante se describen cada una de las fases de este trabajo y sus resultados.

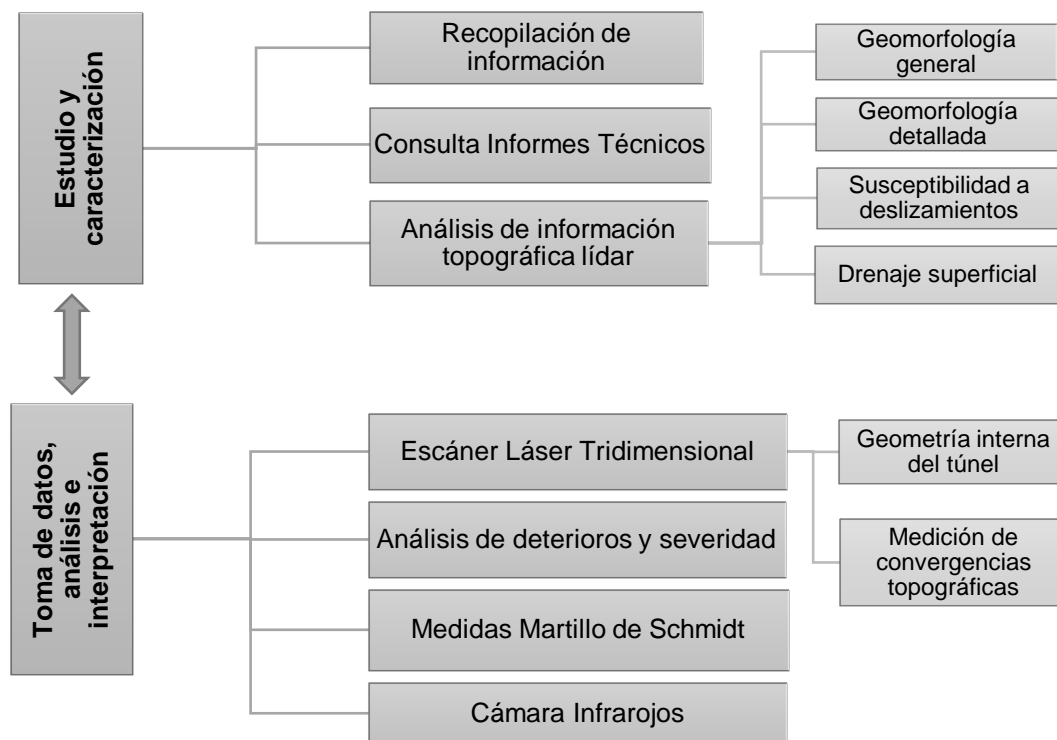


Figura 2. Diagrama de flujo de las etapas y métodos utilizados para la evaluación del túnel Zurquí

Recopilación de información y Consulta de Informes Técnicos

La Información referente al túnel Zurquí, se obtuvo de diferentes fuentes, entre las que se pueden mencionar: mapas, informes internos del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), LanammeUCR, Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), Municipalidades, artículos de prensa, entre otros. A continuación, se resume la información recopilada sobre esta estructura y el tramo de la RN-32 en la que se encuentra ubicado. Esta información es básica para la caracterización primaria del túnel.

El túnel Zurquí está ubicado en una zona que se puede considerar como rural de montaña, dentro de los límites del Parque Nacional Braulio Carrillo. Es parte de la sección de control No. 10990, que tiene una longitud de 20 km y está ubicada entre el límite cantonal de Vásquez de Coronado y el Cruce de la RN-32 con la RN-4 en la provincia de Limón. La categoría de esta sección de control según el Plan Nacional de Transporte 2010-2035 es de tipo Distribuidores Regionales, la cual corresponde con la segunda categoría por debajo de la Red Vial de Alta Capacidad. La razón por la cual esta sección está en la segunda categoría a pesar de ser una ruta tan importante, se debe a que al estar en una sección de montaña dentro un Parque Nacional, se ven limitadas las posibilidades de ampliar el ancho de la vía en este tramo en el futuro.

El túnel presenta una longitud de 591,7 m, un ancho de 11 m y un alto aproximado de 8 m. Como se detallará más adelante es uno de los túneles de carreteras más largos de América Central. Actualmente está iluminado por lámparas de luz color ámbar, ubicadas en la parte superior central de la corona. Es un túnel bidireccional, de solamente dos carriles (uno en cada sentido), con un tránsito promedio diario (TPD) de 9000 vehículos aproximadamente.

El túnel no está monitoreado en tiempo real desde un centro de control, ni cuenta con un sistema de comunicación directa como teléfono fijo para informar a las autoridades sobre alguna eventualidad. No presenta sistema de ventilación ni elementos de detección ambientales (contaminantes, velocidad del aire, etc). No tiene hidrantes, bocas de incendio equipadas (BIE), extintores ni sistemas de extinción automáticas.

A continuación en la tabla 1, se resumen los datos de los indicadores funcionales y estructurales de la condición de pavimento de la sección No. 10990 que incluye el túnel Zurquí, estos indicadores son medidos anualmente por la UGERVN. El indicador de Índice de Rugosidad de Internacional (IRI) mide la rugosidad del pavimento. Mientras que el indicador de deflectómetro de impacto (FWD) mide la capacidad de soporte del pavimento. El indicador de resistencia al deslizamiento es conocido como GRIP y la Nota Q es el resultado del análisis de los parámetros de funcionamiento y estructurales.

Tabla 1. Indicadores del tramo No. 10990 de la RN-32 donde se encuentra el túnel Zurquí. Datos correspondientes a mediciones realizadas por LanammeUCR entre 2013-2014

Indicador	Resultado	Clasificación
IRI	3,85	Deficiente
FWD	46,68	Baja
GRIP	0,55	Deslizante
NOTA Q	Q4	Se debe trabajar en recuperar IRI
Inversión 2014	7,41 Millones ₡/km	

Con respecto a la evaluación realizada por LanammeUCR entre los años 2012-2013, las mediciones indican que el tramo al que pertenece el túnel Zurquí se deterioró, especialmente en el indicador de de IRI pasando de regular a deficiente. Por esta razón, la inversión en mantenimiento del año 2015, se debería enfocar en la recuperación del IRI. Esto significa que hay que recuperar la regularidad de la superficie para mejorar el confort de los usuarios de esta ruta.

Análisis de información topográfica lidar

En el año 2010, CONAVI contrato la toma de imágenes lidar aéreas de la RN-32 en sector entre el peaje y el cruce con la RN-4, además se realizó un levantamiento lidar terrestre dentro del túnel de resolución media a baja. LanammeUCR tuvo acceso a esta información en el año 2014, los datos de lidar aéreo fueron de gran utilidad para el presente trabajo, sin embargo el levantamiento laser del túnel no se pudo utilizar por la baja resolución con que fue levantada la estructura. La resolución de las imágenes de lidar aéreo corresponde con cuatro puntos por m² lo que permite obtener una topografía muy detallada además de fotografías aéreas de con resolución de hasta 30 cm (Ruiz et al 2014). Con información del Instituto Geográfico Nacional (IGN), se generó un modelo de elevación digital (MED) de la zona de estudio con el que se realizó un análisis geomorfológico general de la zona montañosa de la RN-32. Mientras que con las imágenes lidar aéreas se hizo este tipo de análisis, pero en detalle de la zona del Túnel Zurquí. Además se analizaron las direcciones de flujo de los drenajes superficiales del Cerro Zurquí. A continuación se presentan estos resultados.

Geomorfología general de la zona montañosa de la Ruta 32

Se definió un área de estudio general que incluye la zona montañosa del Parque Nacional Braulio Carrillo (Figura 2). Según el trabajo de Alvarado y Gans (2012), los cerros del Zurquí son volcanes extintos que estuvieron activos hace 1 millón de años aproximadamente. La clasificación geomorfológica realizada en este trabajo indica que existen unidades denudacionales de origen volcánico. El vulcanismo de los Cerros Zurquí se agrupa dentro de lo que se conoce como Paleo Barva, que data de 0,9 a 0,4 millones de años de antigüedad, y consiste en andesitas con plagioclasa y vitreoporfiríticas, además de basaltos olivínicos (Alvarado & Gans, 2012). Este tipo de materiales se altera fácilmente en condiciones tropicales y al meteorizarse produce suelos regolíticos que por su disposición en laderas de altas pendientes y exceso de contenido de humedad, son muy susceptibles a formar deslizamientos.

Estos cerros se encuentran delimitados al norte y al este por los barrancos formados por los ríos General y Sucio respectivamente, los cuales forman parte de la vertiente del Caribe. Se caracterizan por laderas de alta pendiente entre 35° a 55° , muy susceptibles a la erosión fluvial. Son alargados y tienen un fondo del cauce angosto, que se va ensanchando conforme se acercan a las zonas bajas. Además, algunos evidencian alineamientos que pueden corresponder con posibles fallas geológicas. El patrón de drenaje es dendrítico, con grandes cárcavas que aumentan la susceptibilidad a deslizamiento de sus laderas.

En las laderas bajas del sistema montañoso, principalmente al suroeste, se localizan áreas de tipo denudacional volcánico de bajas pendientes con ángulos entre 0° a 15° . Éstas son superficies onduladas a planas con un patrón de drenaje paralelo, que corresponden principalmente a campos de deposición de lahares y ceniza.

En los alrededores del volcán Barva y al noroeste de los cerros del Zurquí se delimita la zona denudacional volcánico con pendientes muy altas, de más de 55° . Presenta un patrón de drenaje radial ya que se desarrolla alrededor del cono del volcán. Además al sureste, se encuentra el cono volcánico del Volcán Irazú el cual también presenta pendientes muy altas, pero en su mayoría son pendientes moderadas de entre 15° a 35° y también se caracteriza por un patrón de drenaje radial.

Al noreste de los cerros se encuentran las zonas de muy baja pendiente que corresponden con los abanicos aluviales. Por lo tanto, son superficies planas onduladas con patrón de drenaje dendrítico y ríos entrelazados, como el Chirripó desarrollándose dentro de la llanura aluvial.

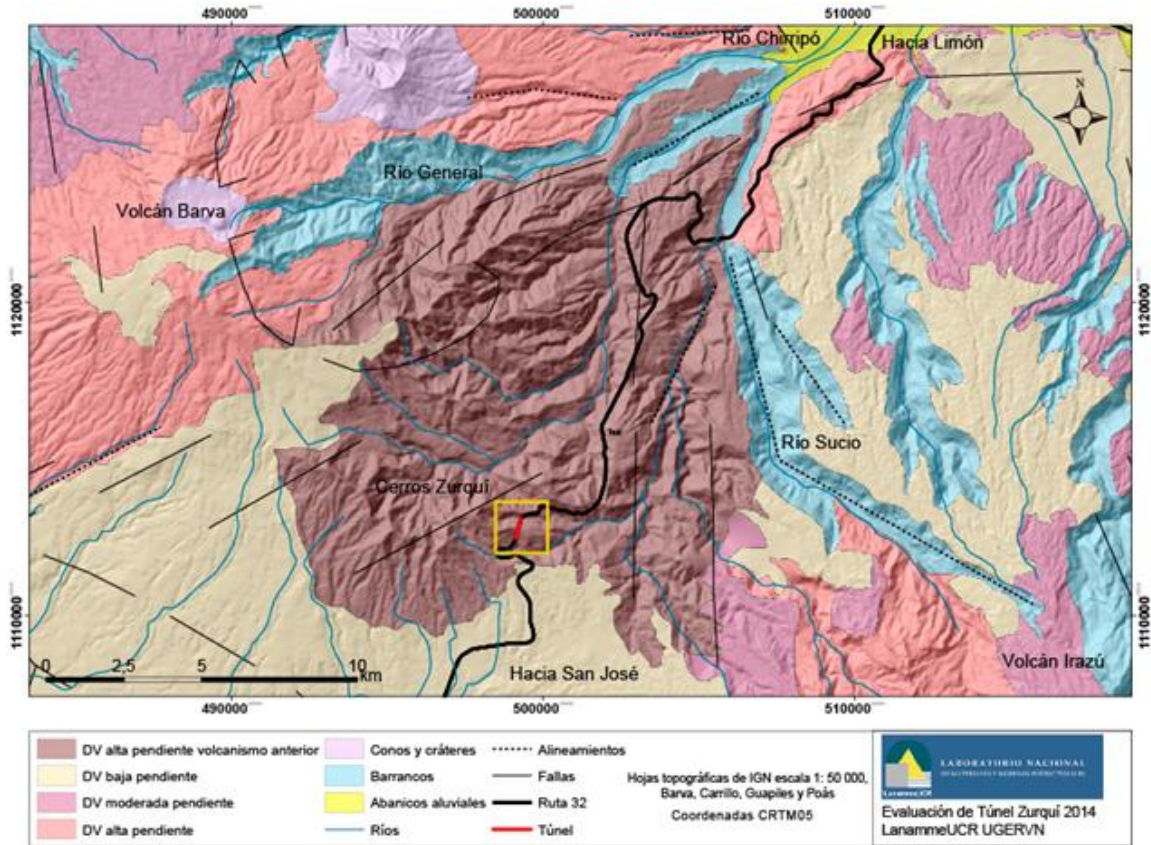


Figura 3: Mapa geomorfológico general de la zona de estudio. Las unidades geomorfológicas fueron seleccionadas según su origen y a partir de las pendientes.

Geomorfología detallada y susceptibilidad a deslizamientos en los alrededores del túnel Zurquí

Se define una zona de estudio específica, delimitada en la Figura 3 con un cuadro amarillo y que abarca los alrededores inmediatos del túnel. Sus coordenadas son 498456norte – 1111792 este y 501223 norte – 1113464 este (*proyección CRTM-05*). Con base en información topográfica lidar, se elaboró un MED detallado sobre el cual se realizó una clasificación geomorfológica y de amenazas a las que esta zona podría verse expuesta, según 6 rangos principales como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2: Clasificación geomorfológica por pendientes del cerro Zurquí y alrededores. Fuente: UGERVN, Lanamme, 2014

RANGO	DESCRIPCIÓN	CARACTERISTICAS	AMENAZA
0,1° - 4°	Zonas más planas.	Fondo del cauce del río Hondura.	<ul style="list-style-type: none"> No presentan amenaza de deslizamiento. Abundante transporte de detritos en épocas de lluvia.
4° - 8°	Zonas planas onduladas.	Terrazas de poca extensión en la ladera izquierda del río Zurquí.	<ul style="list-style-type: none"> No representan ninguna amenaza de deslizamiento
8° - 16°	Zonas de pendientes bajas.	A lo largo de la cima de la montaña central y aguas abajo del cauce del río Zurquí.	<ul style="list-style-type: none"> Baja susceptibilidad a deslizamientos. Sometida a intensa erosión fluvial.
16° - 35°	Pendientes moderadas.	Laderas de la parte alta de las montañas en forma alargada y levemente suavizadas. Zonas bajas en los márgenes de los angostos cauces de los ríos Zurquí y Hondura.	<ul style="list-style-type: none"> Afectadas por la intensa y constante erosión fluvial
35° - 55°	La mayor parte de las laderas.	Laderas largas y disectadas por cárcavas.	<ul style="list-style-type: none"> Alta susceptibilidad a deslizamientos Afectadas por erosión fluvial
> 55°	Pendientes muy altas.	Margen izquierda de la carretera vía San José – Guápiles, producto de los cortes de los taludes	<ul style="list-style-type: none"> Alta susceptibilidad de deslizamientos y desprendimiento de material rocoso

Los deslizamientos observados en las fotografías aéreas, se encuentran principalmente a lo largo de las márgenes de la carretera, en su mayoría en la parte norte del tramo analizado. Estos deslizamientos son de dimensiones variables, de tipo rotacional, traslacional y caída de roca. Están directamente asociados con los cortes en carretera que tienen pendientes con ángulos superiores a 55° y a las pendientes naturales de las laderas también con ángulos fuertes (entre 35° a 55°), que sumado a los efectos de la intensa precipitación, saturación del suelo y la litología sumamente meteorizada, provoca gran inestabilidad en el terreno disparando deslizamientos que provocan daños directos a la vía, tales como fracturas en el pavimento, hundimientos y caídas de suelo y/o rocas que obstruyen el paso. A continuación se presenta el mapa geomorfológico en detalle de la zona del Túnel Zurquí (Figura 4).

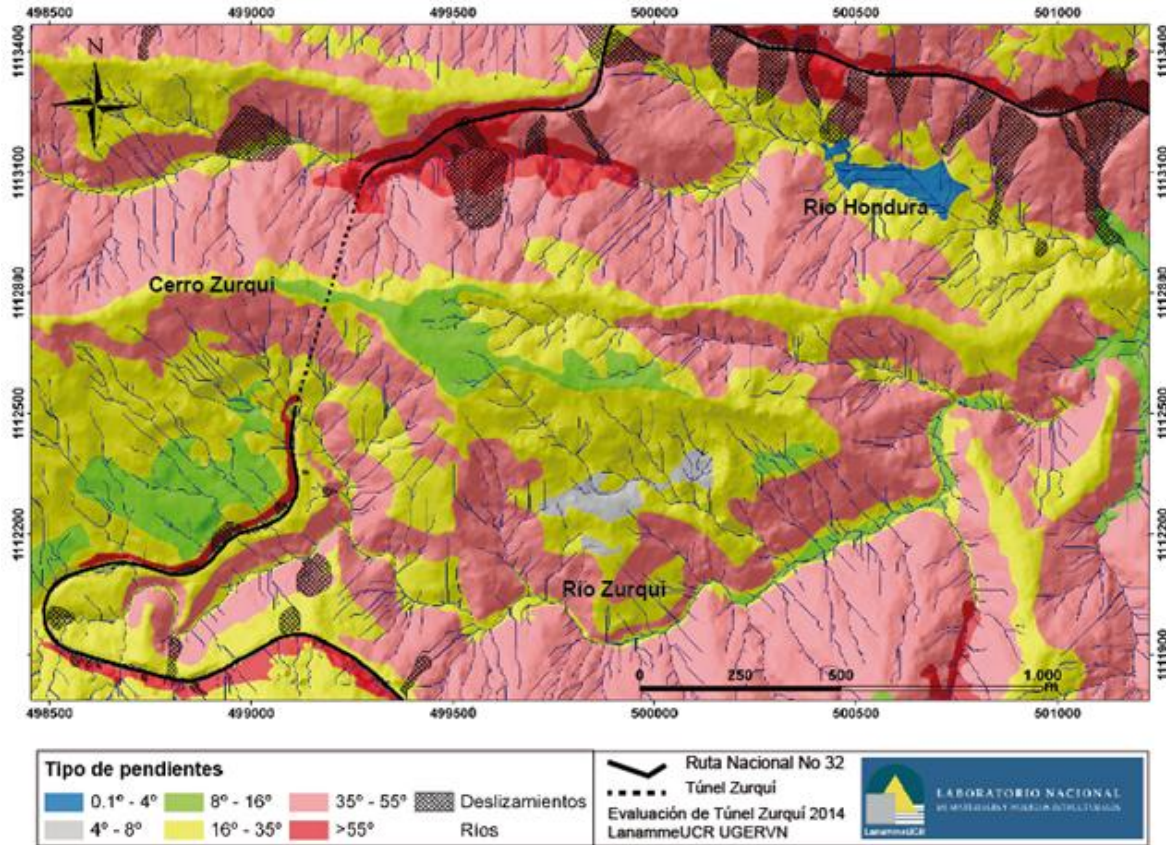


Figura 4: Mapa geomorfológico en detalle de la zona del túnel Zurquí y alrededores.

Análisis de Drenaje superficial

Las quebradas y riachuelos en el sector norte del Cerro Zurquí fluyen principalmente del suroeste hacia el noreste. Algunos de ellos lo hacen directamente sobre la línea del túnel y otros de forma paralela. Además, como se observa en la Figura 5, dos de estos cauces están dirigidos directamente a la salida del túnel. Como se verá más adelante, dentro del túnel las paredes y zonas que presentan mayor humedad, goteos y drenajes funcionando están en la pared del LI (*lado izquierdo*), sentido San José – Limón; mientras que las paredes del LD (*lado derecho*) no presentan esta condición. Una posible explicación de esto se deba a la orientación del túnel con respecto a la dirección del flujo de los drenajes superficiales.

En el sector sur del Cerro Zurquí, las quebradas fluyen principalmente del noroeste hacia el sureste. Varias atraviesan en superficie la línea de túnel y tres de ellas confluyen directamente en el sector izquierdo de la entrada del túnel, a unos 20 metros de distancia aproximadamente, donde forman una pequeña catarata. Al igual que en el sector norte del túnel, las paredes que presentan más humedad son las que se ubican en el LI.

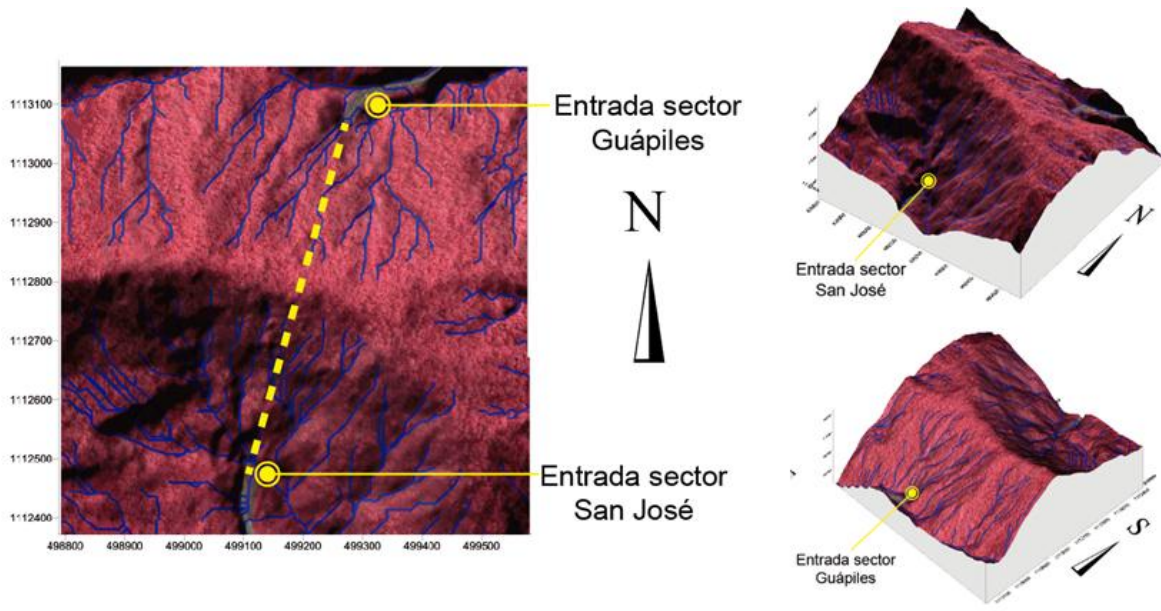


Figura 5: Patrón de drenaje en la zona montañosa inmediatamente sobre el túnel. Modelos de elevación mostrando los patrones de drenaje.

Obtención de la geometría interna del túnel

Para generar la información lídár interna del túnel, se utilizó el Escáner Láser Tridimensional de la marca *Leica*, modelo *C10*, de la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional UGERVN de LanammeUCR, con una resolución media, más detalles sobre este equipo se pueden obtener en (Ruiz et al 2014). Para hacer el levantamiento se tuvo que suspender completamente el tráfico por el túnel por un lapso de unas cinco horas aproximadamente. Para evitar mayores inconvenientes se realizó en horas de la madrugada y con avisos preventivos días antes del levantamiento.

En total, se ubicaron 14 estaciones en la obra (2 externas, 12 internas), separadas a longitudes regulares de 60 metros entre sí. Para el amarre de cada estación, se utilizaron 2 objetivos redondos de 6 pulgadas, ubicados entre estaciones, cada uno a los lados de la vía: en cada sitio de escaneo, se tomó la ubicación de los objetivos tanto hacia adelante como hacia atrás, de tal manera que cada estación tuviera 4 puntos de amarre. Gracias a esto, es posible levantar obras lineales en un tiempo relativamente rápido, conservando muy buena precisión. El modelo final obtenido consta de más de 160 millones de puntos, que presentan un error promedio de ubicación de 0.9 milímetros (Figura 6).

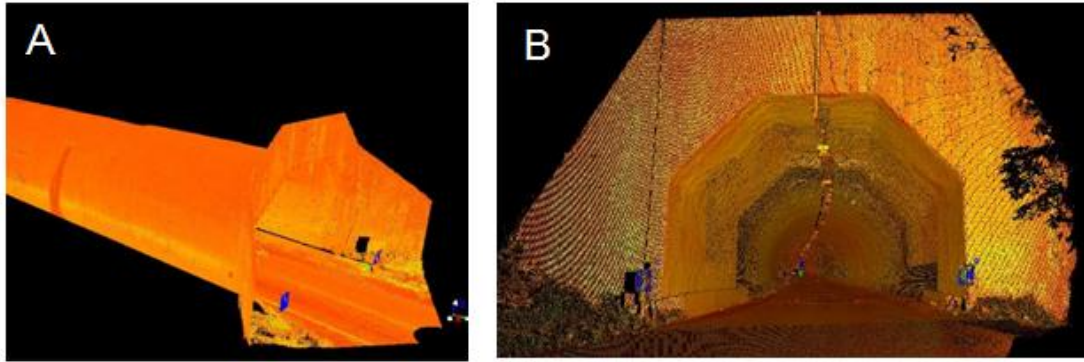


Figura 6 A) Modelo tridimensional obtenido del túnel, vista desde la entrada (lado San José). B) Vista desde la entrada del lado de Guápiles.

Con el nivel de detalle en que se levantaron los datos del Túnel Zurquí, fue posible ubicar la mayor parte de los pines de medición de convergencia (figura 6). De esta manera se obtuvieron secciones transversales y se realizaron un total de 30 conjuntos de medidas de distancia lineal y cruzada entre los pines inferiores y medios (Figura 7). Hay que resaltar que este levantamiento no sustituye la medición con cinta Invar propia de la medición de convergencias, dado que el nivel de precisión que da ésta es 10 veces superior ($\pm 0,1$ mm), cuando se compara con el escáner. Sin embargo, las mediciones obtenidas, permitirán compararse con mediciones futuras, lo que permitirá resaltar zonas con daños que no se puedan ver a simple vista, que incluso pueden comprometer la estructura de la obra. En el documento titulado “Revisión del Diseño del Revestimiento del Túnel Zurquí”, con fecha de julio de 1984 y elaborado por el Ing. Miguel Bolaños y el Geól. Ernesto Bruce (Bolaños & Bruce 1984), que presenta el control de deformaciones internas durante el periodo de construcción del túnel, no se indican los valores iniciales o finales de convergencias que pudieran servir como base de comparación para las medidas obtenidas en este proyecto. Por ello, se pretende que las medidas obtenidas y que se muestran en la tabla 3, sean la base para comparación cuando se realice un estudio similar en el futuro.

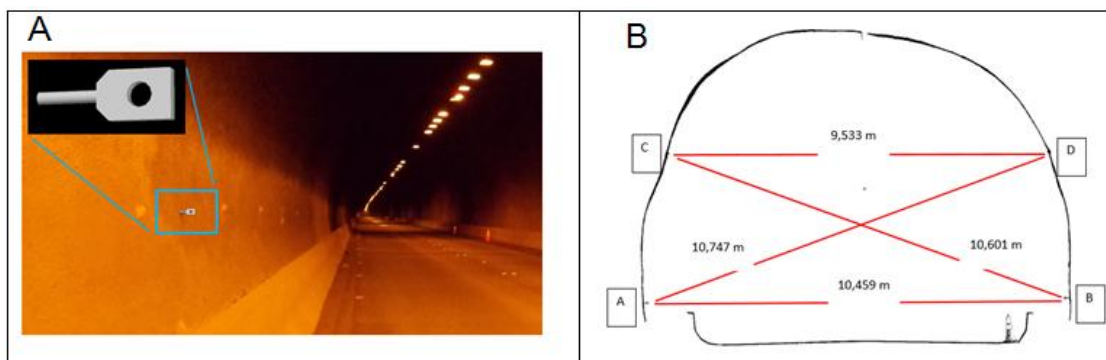


Figura 7. A) Pines de medición del túnel Zurquí (recuadro muestra el detalle). B) Ejemplo de una sección transversal del túnel obtenida a partir del modelo tridimensional, y sus medidas de convergencia (est. 392+60,6).

Tabla 3: Medidas de convergencia obtenidas. * Medido desde la entrada en el lado de San José
** La ubicación de los puntos A, B, C y D es la misma que se indica en la Figura 8, para cada estacionamiento. (1) El gancho en el punto C no existe. (2) El gancho en el punto D no existe

Id	Estacionamiento*	Medidas de convergencia (m)**			
		A-B	C-D	A-D	C-B
1	33+96,5	10,008	8,925	10,061	9,949
2	53+35,9	9,998	8,735	9,910	9,921
3	73+83,9	10,823	10,088	10,927	10,916
4	91+73,5 ⁽²⁾	10,628	-	-	10,610
5	129+12,4	10,512	8,814	10,587	10,522
6	151+05,4 ⁽¹⁾	10,414	-	10,644	-
7	174+98,1 ⁽²⁾	10,507	-	-	10,348
8	203+83,4	10,555	10,588	10,802	10,942
9	227+59,9	10,488	10,389	10,781	10,972
10	242+95,5	10,345	10,327	10,704	10,860
11	269+23,1	10,673	10,069	10,821	11,067
12	277+72,9	10,530	10,232	10,744	10,904
13	299+89,4 ⁽¹⁾	10,648	-	10,973	-
14	326+05,2 ⁽¹⁾	11,299	-	11,203	-
15	351+41,6	10,495	9,440	10,487	10,644
16	369+87,1	10,861	10,225	10,987	11,135
17	392+60,6	10,459	9,533	10,747	10,601
18	416+63,1	10,356	9,906	10,806	10,970
19	445+88,1	10,402	9,872	10,545	11,015
20	452+42,2 ⁽¹⁾⁽²⁾	10,222	-	-	-
21	462+27,2 ⁽¹⁾⁽²⁾	10,502	-	-	-
22	472+43,2	10,327	10,060	10,786	10,979
23	496+47,0	10,206	9,796	10,927	10,850
24	504+33,4	10,674	9,914	11,160	11,570
25	513+59,3	10,249	9,472	10,822	10,724
26	517+62,0	10,185	9,349	10,701	10,741
27	520+59,8 ⁽¹⁾⁽²⁾	10,215	-	-	-
28	533+38,2	10,092	8,278	9,710	9,682
29	553+13,4	10,123	8,601	9,869	9,836
30	572+70,5	10,158	8,927	10,082	9,835

Iluminación del túnel Zurquí

Con el levantamiento lidar y el trabajo de campo se pudo hacer un análisis sobre el estado de la iluminación del túnel. Actualmente esta estructura cuenta con 156 lámparas de luz de color ámbar. Se encuentran ubicadas en la sección superior central de la galería. Con los datos lidar se logró determinar que estas lámparas no están espaciadas de forma regular. Hay una mayor concentración de ellas cerca de las entradas al túnel. En estas zonas tienen un espaciamiento entre ellas que varía de 0,7 m hasta 1 m. En la parte central del túnel el espaciamiento puede llegar hasta 14,5 m (Figura 8). Se determinó que un 97% de la lámparas existentes están en funcionamiento, sin embargo algunas pueden presentar pequeñas desviaciones de la línea de centro de la corona del túnel (Figura 9B).

En esta inspección no se realizaron mediciones de niveles lumínicos dentro del túnel como se recomienda en (Serrano & Salgado 2012). Sin embargo, la ubicación exacta de cada lámpara, los datos de densidad de lámparas obtenidos a partir de este trabajo y con el levantamiento lidar pueden servir para planear este tipo de mediciones en inspecciones futuras.

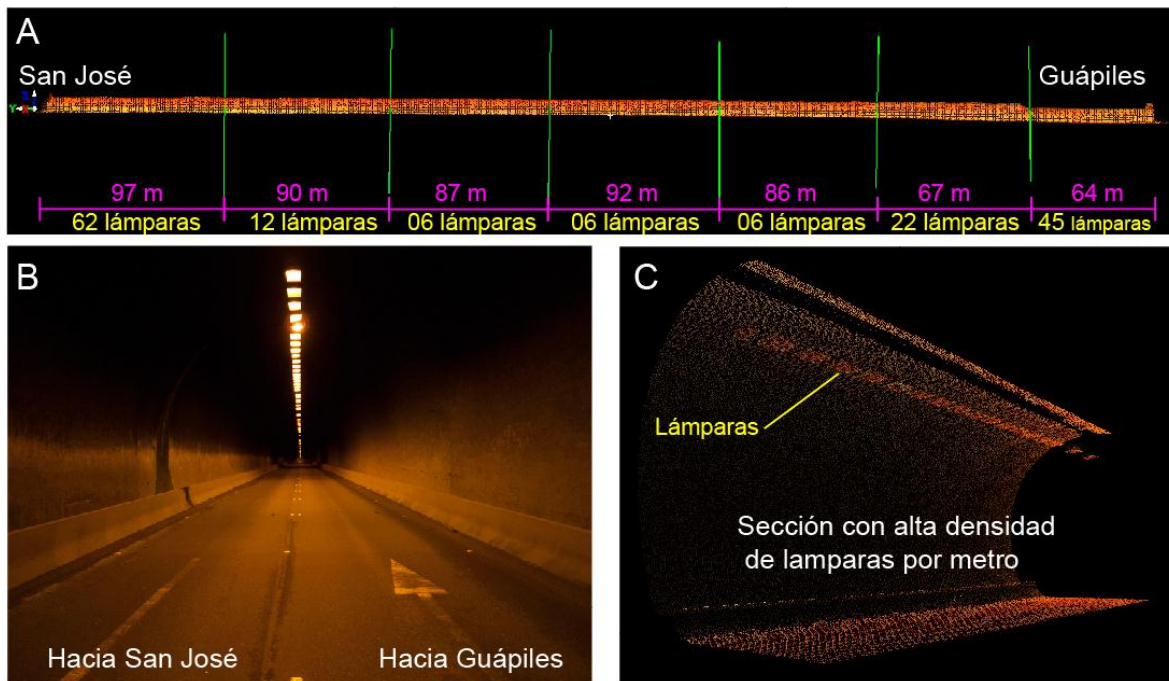


Figura 8. A) Se muestra la densidad de lámparas en el túnel Zurquí por secciones medidas. Se aprecia como hay mayor cantidad de lámparas cerca de las entradas y menor densidad en el centro donde están más espaciadas. B) Fotografía tomada cerca de la entrada del lado de San José con la quinta lámpara desalineada. C) Se muestra un corte generado con las imágenes lidar donde se aprecia una sección con alta densidad de lámparas.

Evaluación visual del túnel

En la inspección realizada se analizó el estado actual del revestimiento de las paredes internas del túnel de concreto lanzado, que debe tener un espesor mínimo de 20 cm (Bolaños y Bruce, 1984). Para facilitar esta operación, el túnel fue dividido en 10 segmentos de 60 metros de longitud cada uno, esto para poder trabajar con un esquema previamente diseñado que permite ubicar y definir los deterioros y su severidad.

En cada uno de los segmentos se evaluaron aspectos como el nivel de humedad en las paredes (leve, moderado o intensa), drenajes de agua de escorrentía que estuvieran funcionando o colapsados, salidas de agua en forma de goteos o chorros en el techo y/o paredes, presencia de eflorescencia, sales y acumulación de precipitados de éstas, grietas en el concreto, y acero expuesto (varillas, malla electrosoldada).

Es importante recalcar que el funcionamiento de los drenajes internos varía en función de la lluvia caída en los días anteriores (suponiendo una respuesta a corto plazo de los drenes). Por lo que es de esperar que, si se realiza una inspección en otra época del año, los resultados obtenidos puedan variar de los mostrados en este informe.

Dependiendo de la severidad e importancia observada en cada una de las variables evaluadas, se asignó un grado de importancia comparativo entre las zonas afectadas. Con esto se pretende atender de forma preventiva y dar prioridad a las zonas con mayor problemática. La clasificación utilizada comprende 5 niveles que son: Muy Alta, Alta, Media, Baja y Muy Baja. Las zonas clasificadas como Muy Alta indican que requieren atención pronta para evitar mayores problemas y reducir su posible propagación. Las zonas clasificadas como Muy Baja presentan algún problema, pero es mínimo, las zonas que no están clasificadas dentro de estas 5 categorías no presentan ningún problema visual.

Además de la evaluación visual de los aspectos antes mencionados, se realizaron mediciones en las paredes del túnel con el esclerómetro, también conocido como el martillo de Schmidt. Se realizaron ensayos del estado del concreto lanzado a intervalos de 20 metros, a una altura aproximada de 1,5 metros. Los resultados obtenidos se muestran junto con la evaluación y caracterización de cada una de las secciones del túnel. Con respecto a esta prueba, los resultados pueden ser afectados por varios factores, entre los que se encuentran la calibración del esclerómetro, la irregularidad de la superficie donde se da el golpe, la presencia de suciedad y/o sales superficiales, el error humano, entre otros, que pueden dar un resultado falso. Según (Bolaños y Bruce, 1984), el concreto lanzado usado en este túnel debe tener una resistencia mínima de 19,6 MPa (200 kg/cm^2) señalada en las especificaciones.

En la figura 9, se muestra un ejemplo de la forma en que se presentaron los datos de esta parte de la evaluación.

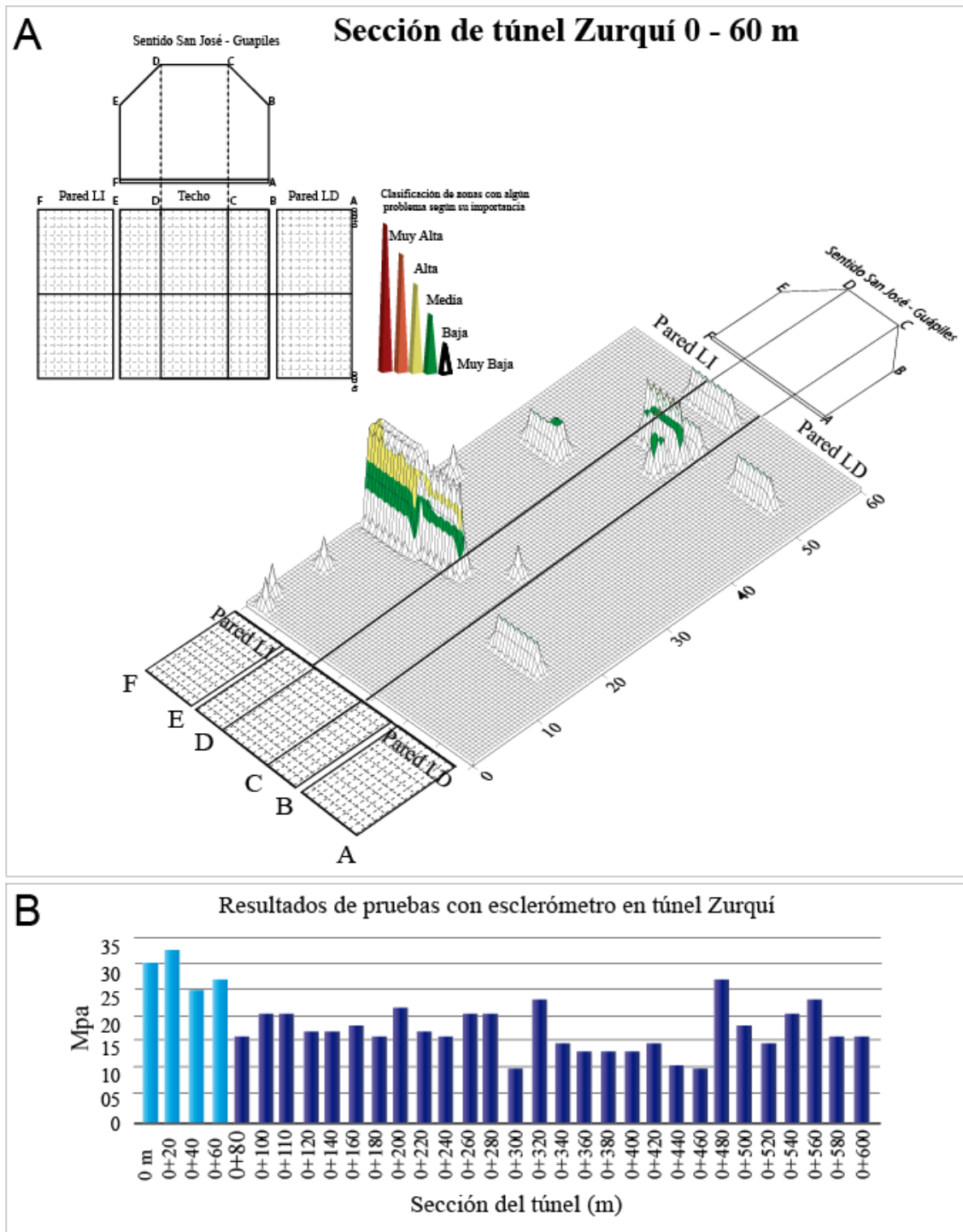


Figura 9. A) Ejemplo de diagramas utilizados para presentar los datos de la evaluación visual con respecto a las paredes y techo del túnel. B) Resultados obtenidos en con esclerómetro en las diferentes secciones del túnel.

También se empleó el uso de cámaras térmicas en las paredes para valorar diferencias de temperatura por humedad, pero no se observaron contrastes

significativos. Por lo que no se incluyen estos resultados. Para próximas evaluaciones del túnel, se recomienda emplear la cámara térmica para valorar los sistemas eléctricos del túnel.

RESULTADOS DE INSPECCIÓN VISUAL

Los principales problemas que se encontraron en la inspección visual se corresponden con drenajes que contienen precipitaciones de sales, acero expuesto de la malla electrosoldada y zonas de humedad con diferentes grados de intensidad (Figura 10). Los valores del esclerómetro se encuentran en un rango de 10,34 a 31,03 MPa.

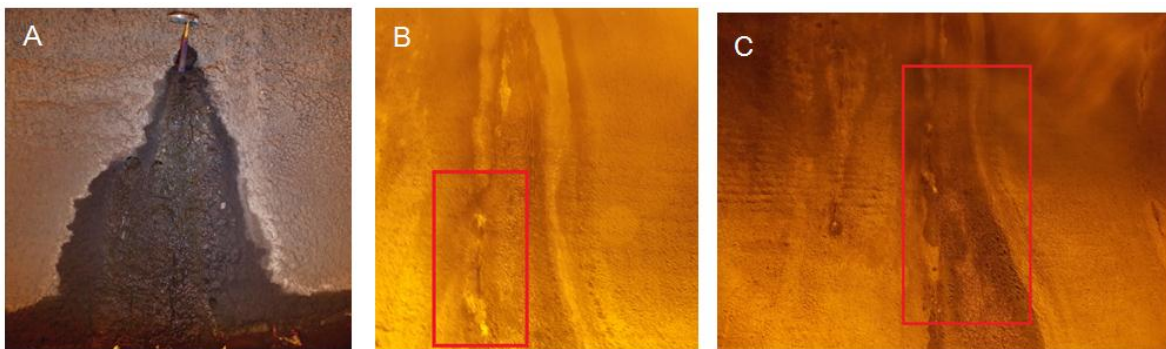


Figura 10. Fotografías de diferentes problemas encontrados en el Túnel Zurquí. A) Drenaje con goteo Intenso y acumulación de sales est. 0+122. B) Zona con humedad y acero expuesto (cuadro rojo) est. 0+530. C) Zona con acero expuesto (cuadro rojo), est. 0+580.

En la Tabla 4 se resume los resultados obtenidos para cada una de las secciones evaluadas. Además los datos obtenidos se presentan sectorizados en 60 metros cada uno y en un único gráfico para observar el conjunto de datos, en las figuras 11 a 14.

Tabla 4: Resumen de los problemas encontrados por sección, Túnel Zurquí

Sección	Hallazgos	Clasificación por importancia	Esclerómetro (MPa)
0+00 – 0+60	- <i>Precipitaciones de sales</i> - <i>Acero expuesto de malla electrosoldada</i> - <i>Goteo</i>	Media – Alta	25,86 - 31,03
0+60 – 0+120	- <i>Goteo</i>	Muy Baja – Media	16,55 - 27,58
0+120 – 0+180	- <i>Acumulación de sales</i>	Baja – Media	17,24 - 20,68
0+180 – 0+240	- <i>Goteo</i>	Muy Baja	17,24 - 22,41
0+240 – 0+300	- <i>Goteo</i> - <i>Acumulación de sales</i>	Media – Alta	17,24 - 20,34
0+300 – 0+360		Alta	
0+360 – 0+420		Muy Baja	13,79 - 15,51
0+420 – 0+480			- <i>Humedad</i>
0+480 – 0+540	- <i>Humedad</i> - <i>Goteo</i> - <i>Chorro de agua</i> - <i>Acero expuesto de malla electrosoldada</i> - <i>Acumulación de sales</i>	Media – Alta	10,34 - 27,58
0+540 – 0+600	- <i>Humedad</i> - <i>Sedimentos entre la pared y la barrera</i> - <i>Acero expuesto de malla electrosoldada</i> - <i>Acumulación de sales</i>	Alta	15,51 - 24,13

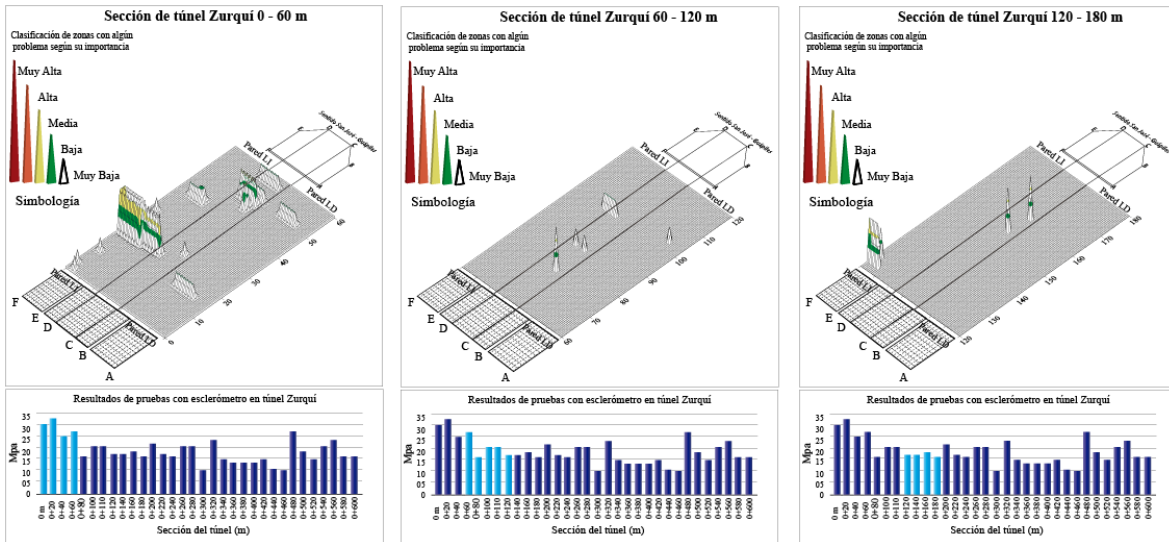


Figura 11. Resultados de evaluación de túnel Zurquí. Secciones desde 0 m a 180m.

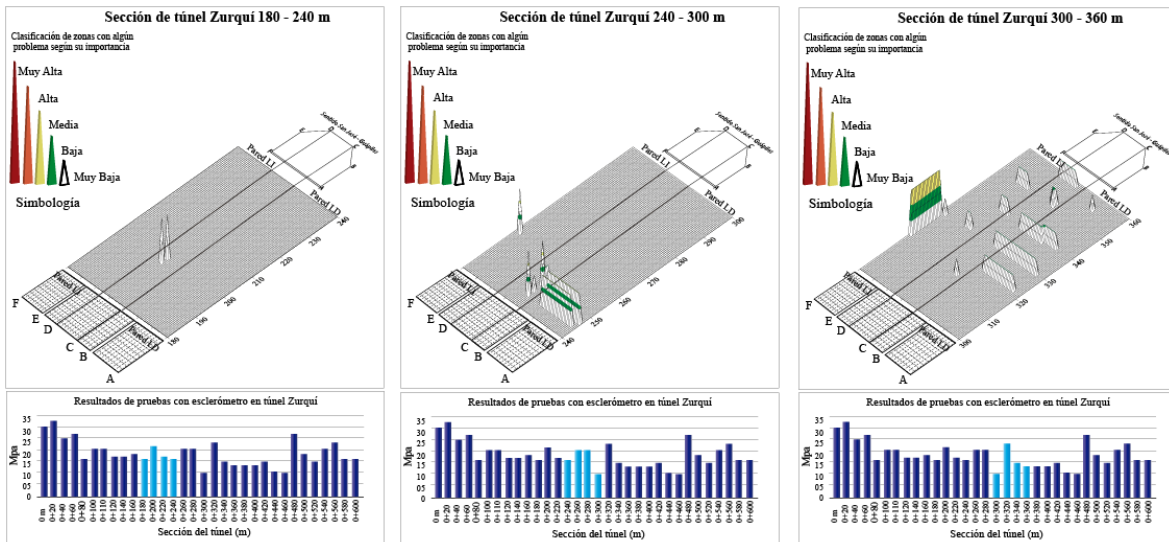


Figura 12. Resultados de evaluación de túnel Zurquí. Secciones desde 180 m a 360 m.

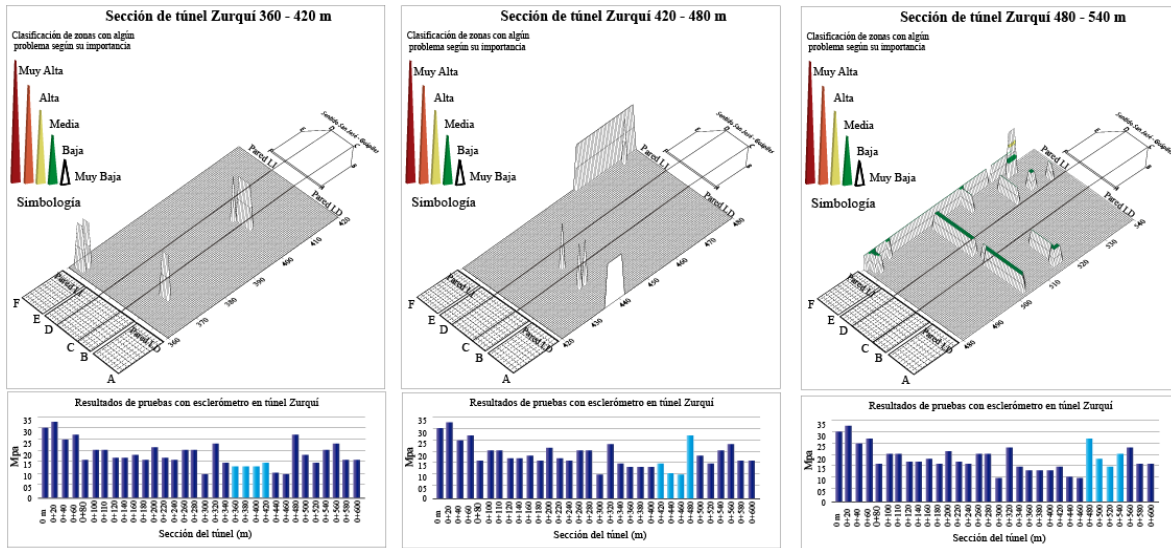


Figura 13. Resultados de evaluación de túnel Zurquí. Secciones desde 360 m a 540 m.

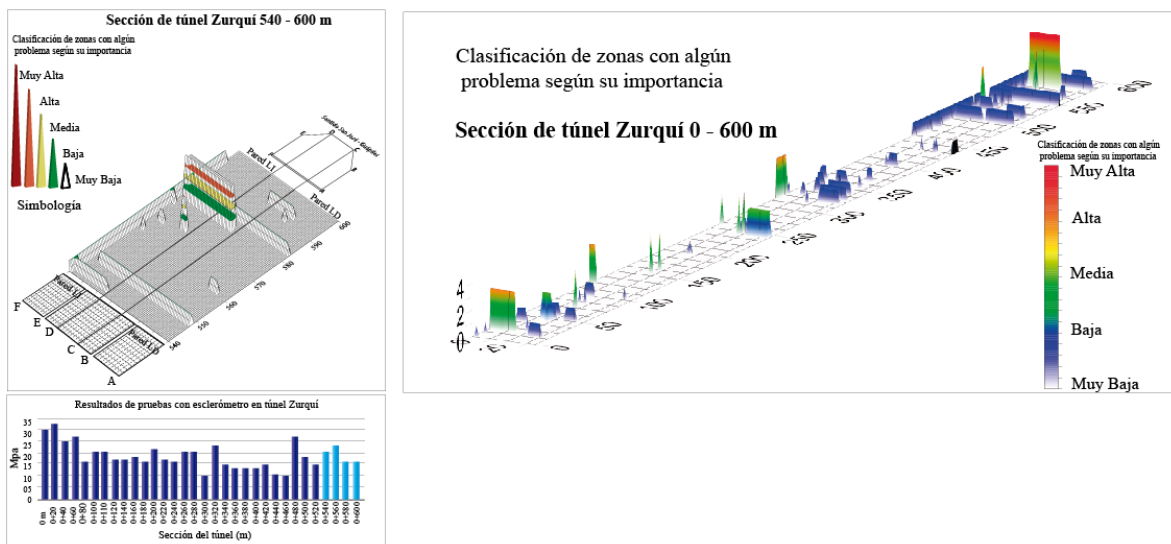


Figura 14. Resultados de evaluación de la sección del túnel Zurquí desde 540 a 600. Resumen de la evaluación de todo el túnel. Se nota como la parte final central de la galería es la que más presenta problemas

Según los resultados de las observaciones y mediciones realizadas, se considera que el túnel en general se encuentra en buen estado, pero es importante realizar actividades que ayuden a preservar la obra, conservando la inversión realizada y niveles de seguridad vial mínimos para los usuarios, por ello se recomendó:

- Realizar una limpieza interna, sobre todo en la orilla de la calzada y en las cunetas, incluyendo la reparación de las que se encuentren en mal estado.
- Dar un mantenimiento adecuado a los drenajes, asegurándose que funcionen de la manera más eficiente posible.

- Mejorar el estado de la señalización vertical y horizontal, así como reponer los captaluces (ojos de gato) que han sido arrancados de su posición.
- Reparar aquellas zonas donde el acero se encuentra expuesto.
- Evaluar, mediante pruebas adecuadas, el efecto de las sales sobre el concreto lanzado. Con esto se pretende establecer si la acumulación de dichas sales presenta algún impacto negativo sobre la resistencia el concreto, así como definir la estrategia adecuada para que el túnel no presente problemas a futuro.
- Reparar aquellas secciones de concreto lanzado que exhiben agrietamiento. Dar un seguimiento regular del estado interno del túnel.
- El estado de la iluminación interna es bueno; sin embargo, se encontraron en varios sitios cables expuestos.
- Realizar lecturas de convergencias en las zonas donde se encuentren problemas. Las medidas dadas en este informe servirán de referencia, y de la comparación. Con ello se podrán definir sitios con desplazamientos de las paredes internas, revelando problemas estructurales.
- Definir un plan de inspección y mantenimiento anual (como mínimo) del túnel, dada la importancia que tiene una obra de este tipo, así como de la carretera a la cual pertenece.
- En caso de un evento sísmico de importancia que afecte la zona, se debe realizar una inspección inmediata del túnel, poniéndole especial atención a los sitios que presentan problemas y que fueron señalados en este informe. De ser posible, realizarse también un escaneo y la posterior obtención de las medidas de convergencias.

MÉTODOLOGIA MEJORADA PROPUESTA PARA FUTURAS EVALUACIONES

El tiempo habitual para inspecciones es muy reducido, tanto en túneles carreteros como hidráulicos, debido al elevado costo que supone sacarlos de operación y por el impacto social que genera su inactividad, en general no son superiores a 4 horas. Por ello el método que se propone en este trabajo consiste en obtener la mayor información posible en el menor tiempo y optimizar la inspección. Además se ha de considerar no solo el tiempo de la inspección, sino también el tiempo que supondría la implementación del mantenimiento necesario (por ejemplo, limpieza de drenajes). En algunos casos, adicionalmente hay que considerar las alternativas de mitigación del impacto generado a la sociedad, como sucede en los cortes de suministro de agua potable.

Para ello se sugiere planificar la visita detalladamente, preparar una plantilla para toma de datos, definir aspectos a considerar y tener predefinida una clasificación de importancia, la cual posteriormente en función de los datos se puede revisar. Toda la información debe estar referenciada, bien con métodos topográficos o indirectamente con odómetros o distanciómetros.

Las herramientas a emplear dependen de la disponibilidad de equipos que tenga la empresa o institución que realice la inspección, en especial de las nuevas tecnologías que tenga adquiridas. Para el caso que abordamos en este informe se pudo contar con las siguientes:

- Recopilar información
- Generar mapas geomorfológicos
- Realizar Fotointerpretación
- Diseñar una plantilla de toma de datos
- Discriminar en clases según importancia
- Establecer referencias topográficas: Realizar un balizado con pintura reflectante. Adicionalmente se recomienda llevar un distanciómetro electrónico o un odómetro para ubicar los puntos de observación.
- Realizar observación visual (levantamiento general):
- Tomar datos con Esclerómetro (martillo Schmidt)
- Tomar datos con Cinta Invar (Convergencias)
- Aplicar Escáner tridimensional (Lídar)
- Utilizar Cámara térmica

Otras técnicas modernas que se utilizan mundialmente en inspecciones de túneles se resumen a continuación. Hay que destacar que cada una de ellas tienen ciertas limitaciones y no todas son aplicables para el caso de estudio, como se muestra en la tabla 5.

1) Georadar:

Una antena emite una onda electromagnética que penetra en el material a analizar; su reflexión es recogida por la antena receptora. De esta forma se registra una señal que, una vez analizada, permite detectar los cambios de material, huecos ó singularidades existentes en el interior del terreno sobre el que se desplaza el emisor-receptor. La antena se desplaza en paralelo con la superficie, a lo largo de una alineación determinada, para obtener un perfil del terreno en profundidad. Hay que señalar que la profundidad del terreno a la que pueden penetrar estas señales está limitada en función de la alta frecuencia de la señal emitida. Para el control del espesor del hormigón con esta técnica es preciso considerar el tipo de sostenimiento utilizado: mallazo, cerchas, utilización de fibras de acero y las características dieléctricas del terreno situado detrás.

2) Ultrasonido:

Se basa en la medida del tiempo de recorrido de las ondas ultrasónicas refractadas dentro de los materiales a estudiar. Se determina la velocidad de las ondas en los distintos medios y las anomalías en los tiempos de llegada de la onda, ya que éstas podrán ser asociadas a la existencia de zonas de hormigón alterado (velocidad menor), o a la presencia de grietas (retrasos en el tiempo de

llegada). El equipo consta con dos palpadores, uno emisor y otro receptor. La toma de datos consiste en medir, para una misma posición del emisor, el tiempo de la primera llegada de la onda en función de la distancia emisor-receptor. Si existen grietas en el hormigón, se puede calcular la profundidad de éstas en base a la diferencia del tiempo de llegada. Este método no es aplicable en túneles en suelos o en roca muy alterada.

3) Micro sondeos eléctricos verticales (S.E.V.):

El objetivo es estudiar la distribución de la resistividad de los materiales basándose en la existencia de un contraste entre los valores de resistividad característicos de las diversas capas del terreno. Para ello, se inyecta una corriente al subsuelo con dos electrodos A y B y se mide la diferencia de tensión en M-N (receptores). Cambiando el espaciado entre electrodos, profundizamos en la investigación.

4) Tomografía eléctrica:

Permite tener una imagen en dos dimensiones de la distribución de resistividad en un plano perpendicular a las paredes del túnel. Consiste en la determinación de la resistividad de las distintas celdas en las que se puede dividir el terreno subyacente bajo un perfil determinado, mediante la utilización de calicatas eléctricas con múltiples dispositivos a lo largo de ese perfil. Es necesario realizar taladros cortos para colocar los electrodos y extraer previamente algunos testigos de hormigón y del terreno para medir sus propiedades eléctricas. Este método no permite calcular la calidad del hormigón y es un poco lento.

5) Impedancia mecánica:

Se basa en las propiedades de propagación, en un medio homogéneo de una onda de velocidad "C". Consiste en proporcionar un choque mecánico, sobre la superficie de hormigón, por medio de un mazo o martillo equipado con un sistema de medición de la fuerza proporcionada, es decir, de un captador de fuerza. A cierta distancia del punto de golpeo, se coloca un geófono o un acelerómetro. Tras el golpe con el martillo sobre la placa de reparto, se produce una onda de reflexión. Para determinar espesores de hormigón proyectado utilizando esta técnica, es necesario obtener la curva de vibración del hormigón.

6) Electromagnetismo:

El objetivo es investigar el revestimiento, su espesor y la presencia de coqueras y huecos en el trasdós. Para este estudio se emplea una antena 3D de última generación, utilizando la tecnología step-frequency, que permiten la emisión prácticamente simultánea de pulsos electromagnéticos a diferentes frecuencias, cubriendo un ancho de banda mucho más amplio que con las antenas tradicionales. El rango de frecuencias que puede cubrir esta antena abarca desde 100 MHz hasta 3 GHz. Esto permite tener una altísima resolución en las capas más superficiales (proporcionada por las altas frecuencias) y una buena profundidad de investigación (gracias a las bajas frecuencias).

7) Laser escáner 3d con canal visible, infrarrojo y geométrico:
 Basado en las mediciones con termografía y láser escáner 3D permite obtener los datos de tres formas simultáneas. 1) Canal Visible. Registra la imagen real del perímetro interior del túnel con calidad fotográfica B/N. 2) Canal infrarrojo – Termografía: Mediante la medida de la variación de las temperaturas en la superficie externa del revestimiento del túnel es capaz de determinar su estado y las zonas donde existen anomalías en su trasdós. 3) Canal Geométrico. Levantamiento topográfico 3D de la superficie del túnel (realización de una sección compuesta por 10.000 puntos cada 2mm a lo largo de toda la longitud del túnel). El proceso de medición permite con una sola pasada obtener los tres tipos de información sobre el túnel lo que minimiza la ocupación de la red y el servicio de la línea.

Tabla 5. Técnicas y aplicaciones de métodos de algunos métodos

Método	Terreno			Revestimiento			Alcance
	Suelo	Roca Sana	Roca Fracturada	Sin fibra	Con fibra	Con anclajes	
Georradar	✓	✓	✓	✓	✗	✓	<ul style="list-style-type: none"> • Necesita sacar muestra • Imposible caracterización de zonas con concreto dañado • Media caracterización de las grietas • Buena caracterización del estado del terreno
Ultrasonidos	✗	✓	✓ * con testigo	✓	✓	✓	<ul style="list-style-type: none"> • Aconsejable sacar muestra • Alta caracterización de zonas con concreto dañado • Alta caracterización de las grietas • Imposible caracterización del estado del terreno
Termografía eléctrica	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<ul style="list-style-type: none"> • Necesita sacar muestra • Baja caracterización de zonas con concreto dañado • Imposible caracterización de las grietas • Baja caracterización del estado del terreno

Respecto a la legislación existente, Costa Rica no cuenta con normas regladas para dichas inspecciones pero según la directiva del 2004 Europea, el período entre dos inspecciones consecutivas de un determinado túnel no debe ser superior a 6 años (Directiva 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 29 de abril de 2004 sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras). Y en base al Real Decreto 635/2006 de España para túneles de longitudes en torno a 500 metros, la periodicidad de las inspecciones debe ser cada 5 años. Y su alcance debe contener estos tres ejes: 1) Obra civil:

pavimento, aceras, sistema de drenaje, revestimiento, etc. 2) equipamiento e instalaciones de seguridad y 3) recurso humano para operar.

INSPECCIONES DE OTRO TIPO DE TÚNELES

La inspección de túneles hidráulicos de generación eléctrica merece una mención por aparte, ya que entran en juego otros aspectos como: la dificultad de sacar de operación una planta, el vaciado del túnel, el gasto que supone la inoperabilidad. Además los daños no pueden ser observables en el día a día, únicamente en las inspecciones realizadas, lo que da mayor importancia a dichas inspecciones.

Por ejemplo, para el Túnel de Pirrís, el costo que supone un vaciado parcial para realizar inspección está entre los 4 y 7 millones de dólares (dato suministrado hace más de dos años). Este valor depende de la situación energética del país y características de la planta, las lluvias, y otras alternativas energéticas disponibles; por lo que puede variar.

La inspección realizada en el Túnel de Río Macho, el cual tiene una longitud de 17 km, en junio de 2010, tuvo un costo aproximado de 12 millones de colones.

La periodicidad de las inspecciones depende de las operaciones de la planta. Así pues en Cachí fue posible realizar una en septiembre de 2009 y otra en el mismo mes de septiembre en el año 2013.

Para el caso de túneles de consumo humano, hay que considerar si el tiempo de inspección es asumible para la población o es necesario aplicar medidas de mitigación como la instalación de servicios temporales de distribución de agua potable.



FIGURA 15. Imágenes del estado del Túnel de Río Macho, en la inspección de junio de 2010.

TUNELES CARRETEROS CENTROAMERICA

A continuación se presenta un resumen de la recopilación realizada de los túneles carreteros existentes en Centroamérica (Tabla 6). Sin considerar los del metro, ferrocarril y de usos hidroeléctricos.

Tabla 6. Túneles carreteros en Centroamérica

PAÍS	NOMBRE	UBICACIÓN	LON(m)	DATOS
Guatemala	Santa María de Jesús	Municipio de Zunil, departamento de Quetzaltenango	227	<ul style="list-style-type: none"> • Inició construcción en 1925. • 1° Uso ferroviario. En 1933 se clausuró. • 2° Uso carretero. En 1950 se rehabilitó y amplió a dos carriles
El Salvador	Antigua calle a Zacatecoluca	Municipio de Cuyultitán, estación 29+175	40	<ul style="list-style-type: none"> • Construcción años 1950 – 1960. • Consultorías australiana y colombiana realizaron diagnóstico de situación, por un monto de 487 mil dólares, aportados por el Fondo Salvadoreño para Estudios de Pre Inversión (Fosep). En 2003 circulan 1,400 vehículos por día, pero para el 2025 circularán cuatro mil. • Las mediciones técnicas revelaron que los túneles son estables y que presentan algunas filtraciones de agua. • Para el Túnel en la antigua carretera a Zacatecoluca, clasificada como vía secundaria, que es el más antiguo, se propuso mejorar la señalización de la vía, pero no así otro tipo de obras, porque no se prevé un crecimiento significativo del tráfico. • Sin embargo, para el caso de los túneles de La Libertad-Acajutla, no tienen la suficiente altura para el tipo y cantidad de tráfico que a diario los atraviesa. También mejorar la iluminación, colocar casetas de vigilancia, estabilizar los taludes y construir drenajes. Además, instalar una buena señalización. • Inversión será de \$30 millones aproximadamente para volver los túneles bajo los estándares internacionales, se realizarán mejoras en la iluminación, instalación de teléfonos de emergencia, mejoras en los drenajes y sensores que midan la cantidad de tráfico
	Túnel 1	Carretera CA: 2, tramo La Libertad-Acajutla, estación 56 + 800	318	
	Túnel 2	Carretera CA: 2, tramo La Libertad-Acajutla, estación 64 + 150	577	
	Túnel 3	Carretera CA: 2, tramo La Libertad-Acajutla, estación 67 + 000	86	
	Túnel 4	Carretera CA: 2, tramo La Libertad-Acajutla, estación 70 + 205	228	
	Túnel 5	Carretera CA: 2, tramo La Libertad-Acajutla, estación 80 + 350	255	
Panamá	“Túnel” de Río Hato, Coclé	Carretera Panamericana con el cruce del Aeropuerto de Río Hato	170	<ul style="list-style-type: none"> • Costo de \$36 millones diseño y construcción del túnel. • Circulación de dos carriles por ambos sentidos

PAÍS	NOMBRE	UBICACIÓN	LON(m)	DATOS
	"Túnel" Vía Brasil	Corredor Vía Brasil	ND	<ul style="list-style-type: none"> • Costo 850\$ millones • Empresa FCC • Circulan a diario más de 140.000 vehículos

CONCLUSIONES

El Túnel Zurquí es uno de las estructuras subterráneas de carreteras más extensas de la región centroamericana. Su importancia es vital para la economía de Costa Rica y por lo tanto su estado y mantenimiento debería ser excelente. Las normativas internacionales de inspección de túneles carreteros no son aplicables a los requerimientos y posibilidades del caso que se estudió en el Túnel Zurquí, no obstante son una guía para orientar y trazar lineamientos a seguir.

Se plantea que este túnel debería de contar con hidrantes, extintores y sistemas para controlar incendios en caso de un accidente de tránsito dentro de la estructura. Además de un sistema de comunicación (teléfono) para dar aviso a las autoridades en caso de alguna eventualidad.

Se calcula que a el valor de la evaluación realizada por LanammeUCR puede tener un precio mínimo de mercado de unos 15 000 US\$, los aportes científicos y técnicos derivados del presente informe se enmarcan dentro de las funciones de ley N°8114 y de los principios de investigación, acción social y transferencia de tecnología que le confieren al LanammeUCR. Respecto a los resultados de la metodología empleada, se alcanzaron los objetivos planteados, en tiempo, obtención y calidad de información. Sin embargo se podrán mejorar aún más en los próximos años implementando otras técnicas e instrumentos aplicados en otros países.

Para el túnel del Zurquí se recomienda realizar inspecciones periódicas cada dos a tres años. En las cuales se deben emplear al menos las mismas técnicas que en el estudio de 2014, potenciando el uso de nuevas técnicas más modernas. También se debe continuar con la obtención de datos de IRI, FWD, GRIP, Nota Q, de la sección en la que se encuentra esta estructura. También se recomienda continuar realizando las convergencias y martillo Schmidt, para poder realizar comparaciones a lo largo del tiempo. Para futuras inspecciones se recomienda el empleo de cámaras térmicas para incluir la valoración del estado de las instalaciones eléctricas.

Sería recomendable la creación de un comité evaluador de túneles multidisciplinar e interinstitucional, que realizara registros en otros países, los cuales sirvieran como puntos de comparación y estandarización.

REFERENCIAS

Alvarado, G. E., Gans, P.B., (2012). Síntesis geocronológica del magmatismo y metalogenia de Costa Rica, América Central. Rev. Geol América Central No. 46, p. 7-122.

Bolaños, M., & Bruce, E., (1984). *Revisión del Diseño del Revestimiento del Túnel Zurquí, Proyecto San José – Siquirres*. Informe de construcción, San José, Costa Rica.

España. Real Decreto 635/2006, (2006). Sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado. Boletín Oficial del Estado (BOE) núm. 126, de 27 de mayo de 2006, páginas 19970 a 19985.

Europa. Directiva 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, (2004). Sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras. Diario Oficial de la Unión Europea (DOUE) núm. 167, de 30 de abril de 2004, páginas 39 a 91.

Galera, J.M., (2001). *Metodología para la inspección de Túneles*, InGeotúneles 4. Capítulo 7, Madrid, España, Ed. Carlos López Jimeno

Ministerio de Obras Públicas y Transportes, División de Obras Públicas. MOPT Gobierno de Costa Rica, (1988). *Proyecto San José – Siquirres*. Informe final de construcción, Bel Ingeniería, San José, Costa Rica.

Municipalidad de Vásquez de Coronado. Sitio Web. Consultado Octubre 2014. <http://www.coromuni.go.cr/tunel-zurqui.html>

Ruiz, P., Garro, J., Soto, G., (2014). El uso de imágenes lidar en Costa Rica: Casos de estudio aplicados en geología, ingeniería y arqueología. Rev Geol. Amer Central. No. 51 p. 7-31

Serrano, T., & Salgado, P., (2012). Inspección de túneles de Carretera. INGEOPRESS. Madrid, España Sección Seguridad. No. 214.