

EVALUACIÓN DE TÚNELES CARRETEROS EN COSTA RICA: TÚNEL ZURQUÍ, RUTA NACIONAL 32

Unidad de Gestión y Evaluación de la
Red Vial Nacional:

Geol. Paulo Ruíz- Cubillo
Ing. Cristian Valverde-Cordero
Ing. Francisco Garro
Ing. Jairo Sanabria-Sandino

Ing. Ronald Naranjo-Ureña
Geog. Paul Vega-Salas
Ing. Roy Barrantes-Jiménez,
Coordinador UGERVN

I. INTRODUCCIÓN

La evaluación e inspección de túneles carreteros después de su construcción, es un proceso que se debe ejecutar periódicamente para asegurarse de la existencia y cumplimiento de los programas de mantenimiento. La determinación del estado de la obra después de la ocurrencia de eventos sísmicos o atmosféricos extremos es muy importante para detectar problemas generados por estos eventos. 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 deberían servir como una memoria histórica y técnica de la estructura, para poder realizar comparaciones después de terremotos o eventos atmosféricos extremos. En Costa Rica, la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (UGERVN) de LanammeUCR ha dado los primeros pasos para tener una metodología sistemática y reproducible de evaluación de este tipo de estructuras que se adapte a nuestras condiciones (Ruiz et al., 2015). Además, la UGERVN ha realizado dos evaluaciones del túnel Zurquí desde el año 2014 (Garro et al., 2015 y Ruiz et al., 2017).

Debido a que la legislación existente en Costa Rica no cuenta con normas regladas para inspecciones de túneles carreteros, se han seguido y adaptado guías y manuales de inspección europeos. Los tiempos entre inspecciones también han sido adaptados a nuestras condiciones y contexto geológico, por ejemplo: el túnel Zurquí se ha evaluado dos veces en un periodo de tres años, 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. En lo que sí hemos sido congruentes es que el alcance de las evaluaciones deben contener dos ejes:

- 1) Obra civil: pavimento, aceras, sistema de drenaje, revestimiento, etc.
- 2) Equipamiento e instalaciones de seguridad.

El presente trabajo se basa en las dos evaluaciones mencionadas, realizadas por la UGERVN y varias visitas realizadas entre el 2014 y el 2017 a esta estructura. El objetivo principal de las evaluaciones realizadas por la UGERVN fue mostrar el estado del Túnel Zurquí, con el fin de 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 adecúe a los estándares mínimos esperados para un túnel carretero de una Ruta Nacional, y así salvaguardar la inversión realizada, disminuyendo la vulnerabilidad del túnel ante eventos naturales que puedan afectarlo. La metodología utilizada en estas evaluaciones podría utilizarse en estructuras similares de la región.

Comité Editorial 2017:

· Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, PhD, Coordinador General PITRA, LanammeUCR

· Ing. Raquel Arriola Guzmán, Unidad de Normativa y Actualización Técnica, PITRA, LanammeUCR

II. EL TÚNEL ZURQUÍ

El túnel Zurquí está dentro de la Ruta Nacional No. 32 (RN-32), al ser parte de la Red Vial Nacional su evaluación entra dentro de las funciones que por ley el LanammeUCR debe realizar. La UGERVN ha realizado dos evaluaciones de este túnel desde el año 2014. En este periodo de tiempo, han ocurrido sismos moderados en la zona cercana al túnel y además en noviembre del 2016, el país se vio directamente afectado por el huracán Otto lo que ha justificado aun más su evaluación periódica.

La RN-32, comunica la ciudad de San José en el Valle Central desde Barrio Tournón hasta la Ciudad de Limón en el sector Caribe de Costa Rica (Figura 1). Es una ruta de gran importancia para el desenvolvimiento económico del país, ya que por ella pasan gran cantidad de productos de importación y exportación que entran o salen respectivamente por los puertos ubicados en Limón.

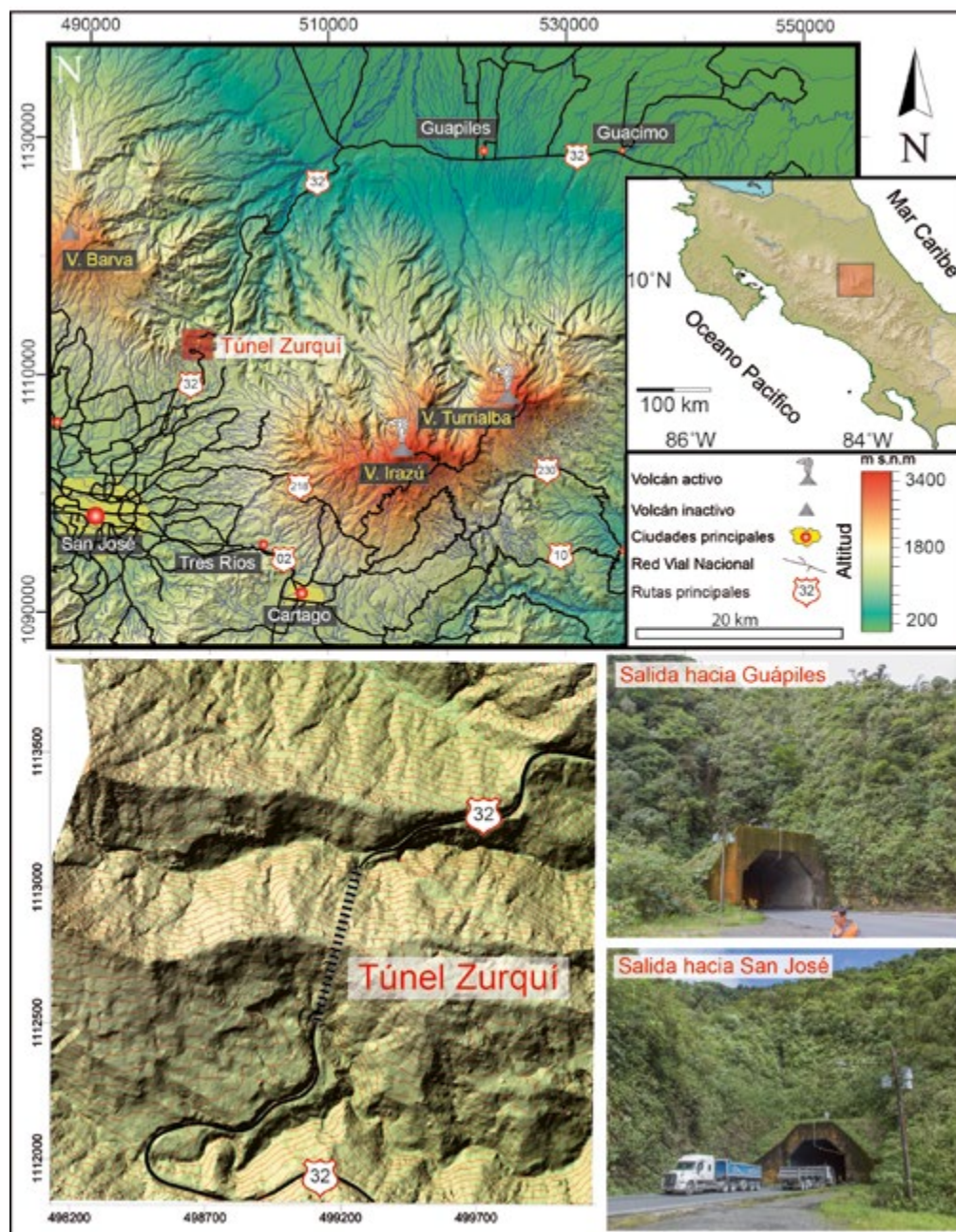


Figura 1. Ubicación de la Ruta Nacional No. 32 en su tramo de montaña y túnel Zurquí.

En la sección de montaña entre San Isidro de Heredia y el Cruce de Río Frío se encuentra el túnel Zurquí, este atraviesa el cerro del mismo nombre. Este túnel presenta una longitud de 591,7 metros, y un ancho y alto aproximados de 11 y 8 metros, respectivamente. Las paredes internas y techo del túnel están revestidas con concreto lanzado, con un espesor mínimo de 20 cm (Bolaños y Bruce, 1984). Fue construido por la firma inglesa Kier Internacional, quien lo concluyó en el año de 1984 con un costo de 190 millones de colones en ese momento.

Debido a los materiales geológicos (rocas volcánicas) y las condiciones climáticas de la zona, la construcción de esta obra fue una labor muy compleja. La estructura representa un hito de la ingeniería del país, ya que es el único túnel para automóviles funcionado en una ruta nacional y aún hoy, sigue siendo el más largo de América Central. Para su construcción, inicialmente se hizo un túnel piloto de un metro de diámetro para examinar rocas y evaluar su consistencia. Es el primer túnel en Costa Rica que utilizó la técnica de concreto lanzado para recubrir sus paredes internas.

III. METODOLOGÍA

La metodología que se utilizó para las evaluaciones del túnel por parte de la UGERVN incluye una inspección visual de la superficie de ruedo, el concreto de las paredes, techo, drenajes e iluminación entre otros aspectos. La inspección visual se complementa con el levantamiento de información detallada mediante herramientas de alta tecnología como cámaras térmicas de alta resolución y un escáner LiDAR con el que se hizo un modelo completo del túnel en tres dimensiones. Además se realizaron ensayos no destructivos en la paredes cubiertas con concreto lanzado del túnel.

Con datos de la Red Sismológica Nacional de la Universidad de Costa Rica (RSN) y el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica (LIS), se hizo un análisis de eventos sísmicos que desde 1984 han generado intensidades sísmicas entre III - VI en la zona de montaña de la RN-32.

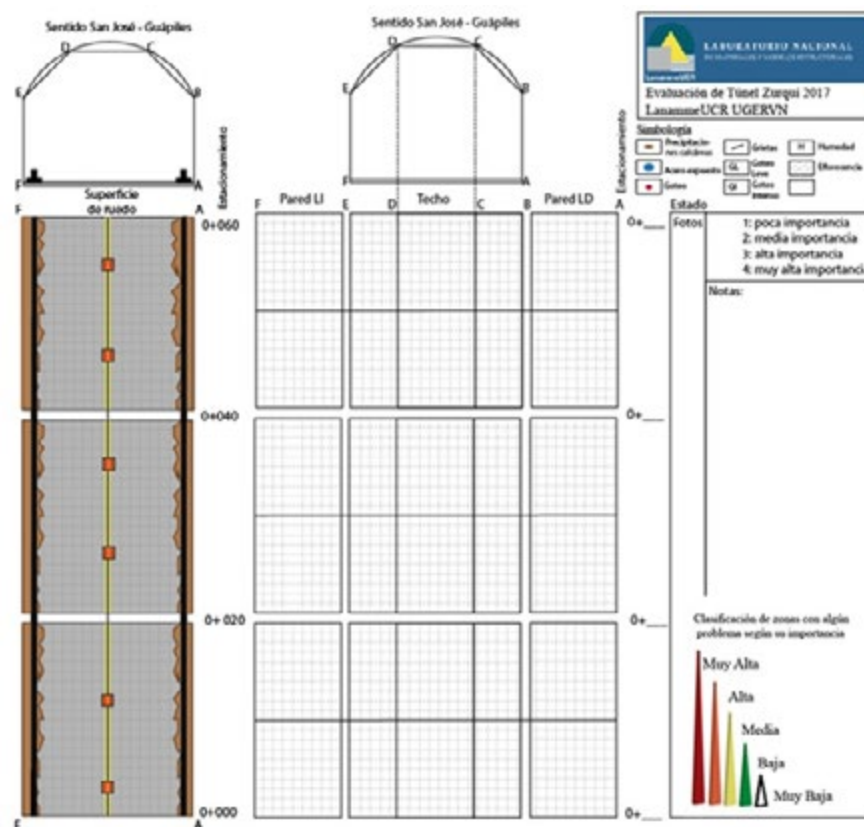


Figura 2. Ejemplo de cuadrículas de evaluación visual para daños en paredes, techo y pavimento del túnel. Sigue el sentido San José – Limón según aumenta el estacionamiento, la altura de la pared vertical derecha (LD) se denota con las letras A a B, la vertical izquierda (LI) con las letras E a F, y el techo está abarcado desde las letras B a E, la superficie de rodadura corresponde con las letras F y A. Además se muestra la clasificación utilizada para determinar la severidad de las zonas con algún problema según su importancia.

La inspección visual se realizó en la totalidad del túnel, incluyendo paredes, el techo o corona y calzada. Para mostrar los diferentes elementos evaluados se utilizó una plantilla cuadriculada diseñada desde la 2014 (Garro et al., 2015. Ver Figura 2). El túnel fue dividido en 10 segmentos de 60 metros de longitud cada uno. En esta cuadrícula se ubicaron y definieron los cambios, elementos nuevos, zonas con humedad, daños en el concreto lanzado, eflorescencias, deterioros y su severidad.

IV. RESULTADOS

Se presenta una recopilación de los eventos sísmicos que han ocurrido en Costa Rica entre el año que se concluyó la construcción del túnel Zurquí (1984) y el año 2017; así como los principales resultados obtenidos en las evaluaciones realizadas por la UGERVN a esta estructura entre 2014 y 2017.

4.1 Actividad sísmica importante en el país desde la construcción del túnel Zurquí hasta 2012

Desde la culminación de la construcción del túnel Zurquí en el año de 1984, en el territorio nacional han ocurrido sismos de gran importancia. El origen de estos eventos ha variado, ya que hay algunos que se relacionan con procesos de subducción de las placas Cocos y Caribe, así como sismos que se asocian al Cinturón Deformado del Norte de Panamá y otros a fallas locales.

Para el siguiente análisis solamente se tomaron en cuenta los sismos que según los datos recopilados y referencias, hayan generado intensidades de III o superiores (según escala de Mercalli Modificada MM) en la zona donde se ubica el túnel. Los valores de intensidad MM se pueden asociar con rangos de aceleración pico máximas (PGA_{max}), para esto se utilizó las formulas propuestas para Costa Rica por Linkimer (2008), los resultados se muestran en la Tabla 1. La ubicación de estos sismos y sus intensidades se presentan en la Figura 3.

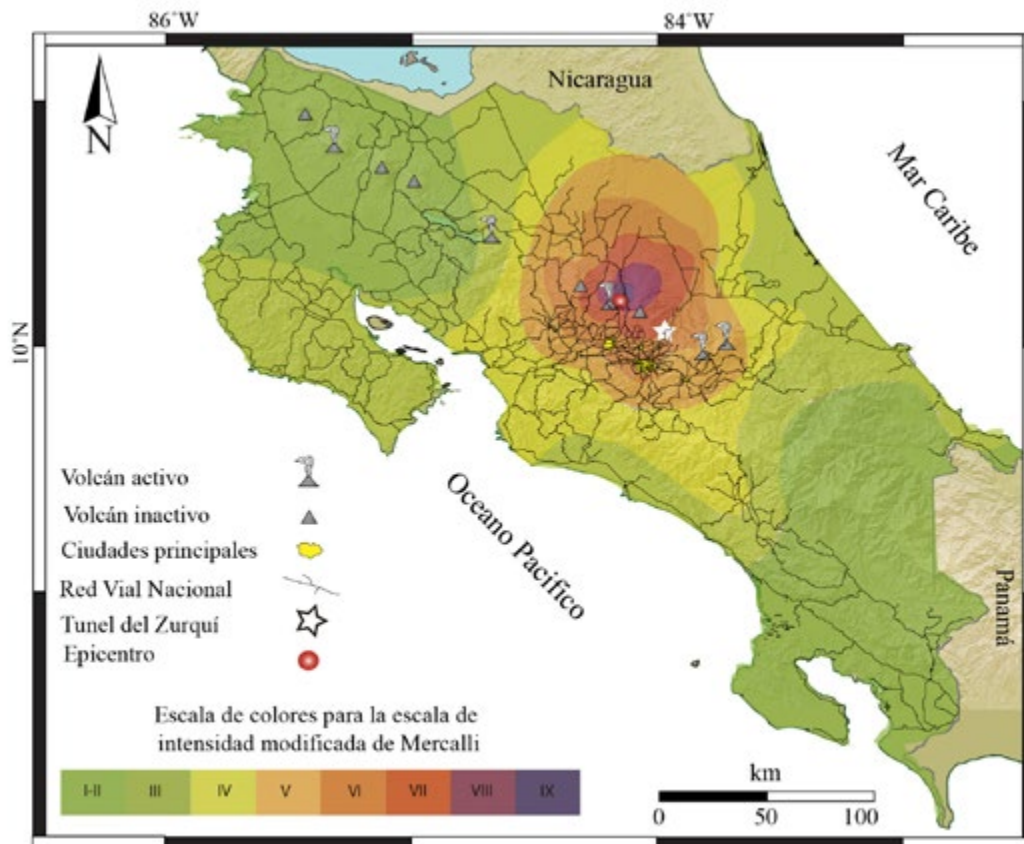


Figura 3. Mapa con la ubicación e intensidades del Terremoto de Cinchona y su relación con la ubicación del túnel Zurquí.

Tabla 1. Resumen de los principales eventos sísmicos con intensidad Mercalli Modificada (MM) igual o superior a III en el sector de montaña de la RN-32, ocurridos en el país después de la construcción del túnel Zurquí.

Información sísmica				PGA en la zona de montaña de la RN-32		Referencias
Fecha	Sismo	Magnitud (Mw)	Intensidad MM en la zona de montaña de la RN-32	Ecu. 1 y 2	Ecu. 3 y 4	
23/10/2012	Nosara	6.3	III	4,9 - 13,3	5,6 - 15,0	http://www.lis.ucr.ac.cr/mapas/2012-10-23-18:47:21/
05/09/2012	Sámara	7.6	V	36,0 - 80,3	40,3 - 84,7	RSN.,2012: El terremoto de Sámara del 5 de setiembre del 2012.-136 págs.
13/05/2011	Acosta	5.8	IV	13,3 - 36,0	15,0 - 40,3	http://www.lis.ucr.ac.cr/mapas/2011-05-13-16:50:21/
08/01/2009	Cinchona	6.2	VI	80,3 - 146,7	84,7 - 139,6	RSN.,2009: El terremoto de Cinchona del 8 de enero de 2009.-138 págs.
20/11/2004	Damas	6.2	IV	13,3 - 36,0	15,0 - 40,3	RSN.,2004: Terremoto de Damas(Quepos) del 20 de Noviembre del 2004
25/12/2003	Puerto Armuelles	6.5	IV	13,3 - 36,1	15,0 - 40,2	http://www.lis.ucr.ac.cr/index.php?id=69
31/07/2002	Burica	6.2	III	4,9 - 13,3	5,6 - 15,0	http://www.lis.ucr.ac.cr/index.php?id=70
20/08/1999	Quepos	6.9	IV	13,3 - 36,0	15,0 - 40,3	ROJAS,W.,REDONDO,C.,2002: El temblor de Quepos del 20 de agosto de 1999(6.9 Mw): Fuente sísmica y evolución de la sismicidad.-Rev Geol de Amer. Central, 26: 65-70, 2002.
22/04/1991	Limón	7.7	VI	80,3 - 146,7	84,7 - 139,6	http://www.lis.ucr.ac.cr/index.php?id=75
22/12/1990	Piedras Negras	6	V	36,0 - 80,4	40,3 - 84,8	http://www.lis.ucr.ac.cr/index.php?id=68
25/03/1990	Cóbano	7	V	36,0 - 80,3	40,3 - 84,7	RSN., 1991: La crisis sísmica del golfo de Nicoya y eventos sísmicos relacionados, Costa Rica, 1990
30/12/1952	Patillos	6.1	VII	146,7 - 268,0	139,6 - 230,2	Montero, W., Alvarado, G., 1995: El terremoto de patillos del 30 de diciembre de 1952(Ms=5,9) y el contexto neotectónico del volcan Irazú, Costa Rica

Según los datos recopilados en la Tabla 1, el túnel Zurquí ha soportado intensidades (MM) máximas de VI que corresponden con rangos de PGA_{max} de 80,3 - 146,7 cm/s^2 . Estos valores fueron generados en el sector de montaña de la RN-32 por el Terremoto de Cinchona en el año 2009. Este evento se originó por una falla local y su epicentro se ubicó a una distancia de 26 km del túnel en las faldas del volcán Poás. Debido a que su origen fue superficial (5 km) la energía se disipó rápidamente y las aceleraciones pico de la zona epicentral se disiparon también. No se han encontrado reportes de daños en la estructura del túnel generados por este sismo. Sin embargo, esto no significa que la estructura haya sido evaluada detalladamente después del evento.

En el año 2012 el Terremoto de Sámara de magnitud 7,6 Mw generado por procesos de subducción, presentó intensidades de V (MM) en el sector de montaña de la RN-32, esta intensidad corresponde a valores de PGA_{max} de 36,0 - 80,3 cm/s^2 (Tabla 1). Aunque este sismo tuvo su epicentro en la zona de la Península de Nicoya a una distancia de 180 km aproximadamente del túnel, por ser un evento de subducción, con una profundidad somera intermedia y con una magnitud tan importante 7,6 Mw, la energía se distribuyó por todo el país generando intensidades superiores a IV en gran parte del territorio nacional. No se han encontrado registros de reportes de daños en la estructura generados por este evento sísmico. Sin embargo igual que en el caso anterior del Terremoto de Cinchona, esto no significa que el túnel haya sido evaluado detalladamente.

En abril del año 1991, el sector de montaña de la RN-32 registró intensidades MM de VI generadas por el Terremoto de Limón 7,7 Mw. Este sismo fue originado por una falla perteneciente al Cinturón Deformado del Norte de Panamá. Las aceleraciones para esta intensidad MM debieron ser muy similares a las registradas por el Terremoto de Cinchona y están en el rango de 80,3 - 146,7 cm/s^2 (Tabla 1). Este no fue el primer sismo importante al que se enfrentó el túnel Zurquí, debido a que en 1990 los sismos de Piedras Negras y Cóbano ya habían generado intensidades de V en ese sector. Igual que en los casos mencionados anteriormente, no hay reportes de daños o evidencias de que haya sido evaluada la estructura después de los sismos.

El daño a un túnel durante un evento sísmico es un problema que debe ser estudiado ya que este podría resultar en el bloqueo de una ruta principal o del aprisionamiento de personas que transiten dentro del túnel en ese momento. Existen casos de túneles dañados en Taiwan y Japón (Wang et al., 2001 y Jiang et al., 2010) por sismos de magnitud similar a los que el Zurquí se ha visto expuesto en su historia.

Debido a la falta de información con respecto a evaluaciones del túnel después de eventos sísmicos, se plantea la necesidad de que la Administración cuente con un protocolo de evaluación inmediata de la estructura después de un sismo, que genere intensidades como las que se han mencionado en esta sección.

4.2 Estado de la superficie de rodamiento del túnel Zurquí

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 ubicada 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.

Los datos funcionales y estructurales de la condición de pavimento de la sección No. 10990 que incluye el túnel Zurquí, obtenidos de las evaluaciones del 2014 y 2016, indican que el tramo mejoró con respecto al IRI pasando de deficiente a regular, la condición de FWD sigue siendo la misma al igual que la de GRIP, la nota Q mejoró pasando de 4 a 2 para una clasificación que indica mantenimiento y preservación. La tasa de inversión aumentó considerablemente pasando de € 7,41 millones/km a € 37,28 millones/km (Tabla 2).

Tabla 2. Comparación de indicadores del tramo No. 10990 de la RN-32 donde se encuentra el túnel Zurquí

Indicador	Resultado 2013-2014	Clasificación 2013 - 2014	Resultado 2015-2016	Clasificación 2015 - 2016
IRI	3,85	Deficiente	3,25	Regular
FWD	46,68	Baja	44,16	Baja
GRIP	0,55	Deslizante	0,57	Deslizante
Nota Q	Q4	Se debe trabajar en recuperar IRI	Q2	Mantenimiento de preservación
Tasa de Inversión ⁽¹⁾	€ 7,41 millones /km	*	€37,28 millones /km	

⁽¹⁾ Datos correspondientes a mediciones realizadas por LanammeUCR entre 2013-2016 Fuente: (Sanabria-Sandino, Barrantes-Jiménez, & Loría-Salazar, 2015)

A partir de las inspecciones visuales del 2014 y 2017 así como los datos LiDAR de la superficie de rodaje del túnel, se determinó que esta presenta problemas que son originados por infiltración y goteo en el techo del túnel y que por el largo de la estructura (591,7 m), estos no son reflejados en los análisis de la Tabla 2.

Los principales problemas que se determinaron en la superficie de rodaje dentro del túnel Zurquí son: desprendimiento de la capa asfáltica, desgaste, acumulación de humedad y sedimentos así como flujos de agua que corren continuamente por el centro de la calzada. En la Figura 4 se muestran algunos de estos problemas que fueron observados y medidos con el escáner LiDAR así como en fotografías convencionales.

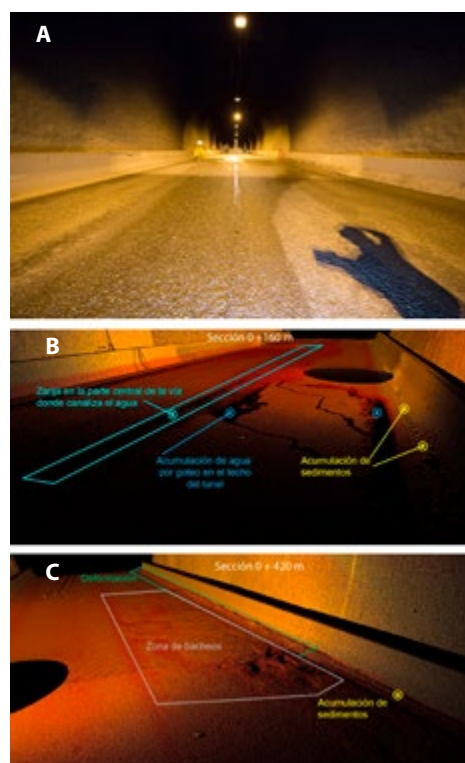


Figura 4. Fotografía y modelos tridimensionales de varias secciones del túnel. A) Las zonas oscuras denotan acumulación de agua superficial. B) En el centro de la carpeta se puede observar la zanja (el óvalo sin información denota el cono ciego creado al estar el escáner ubicado en ese sitio). C) A la orilla de la barrera divisoria, se observa acumulación de sedimentos en la cuneta.

En diferentes secciones del túnel, sobre el pavimento hay faltante de captaluces (ojos de gato), en el caso de que existan algunos están cubiertos por la goma que se utilizó para pegarlos. En los bordes de la vía a ambos lados de la barrera de contención tipo New Jersey, hay acumulación de sedimentos que no permite el flujo libre del agua.

4.3 Estado de paredes, techo del túnel Zurquí

En las paredes y techo del túnel se encontraron principalmente eflorescencias o precipitaciones de sales en las salidas de los drenajes. Se determinó que estas sales presentan una composición calcárea debido a su reacción con HCl. Los espesores de las sales en las paredes van desde lo milimétrico hasta algunos pocos centímetros (~2 cm).

En sitios muy puntuales se observó el concreto lanzado muy deteriorado y que ha dejado expuesto el acero de la malla electrosoldada. Algunos de estos puntos, principalmente hacia el final del túnel, presentan goteo intenso lo que ocasiona acumulación de humedad en las paredes y la superficie de ruedo. En algunos puntos del techo del túnel los tubos metálicos que sostienen los cables de electricidad del sistema de iluminación están desprendidos. Esto ha generado que en algunos puntos exista goteo intenso.

En la Figura 5 se muestra un resumen de los resultados de la evaluación de la paredes y el techo. Al final del túnel es donde se concentran los problemas más importantes, especialmente en el techo. Se nota como la parte final central de la galería es la que más presenta problemas y de mayor importancia según la clasificación utilizada.

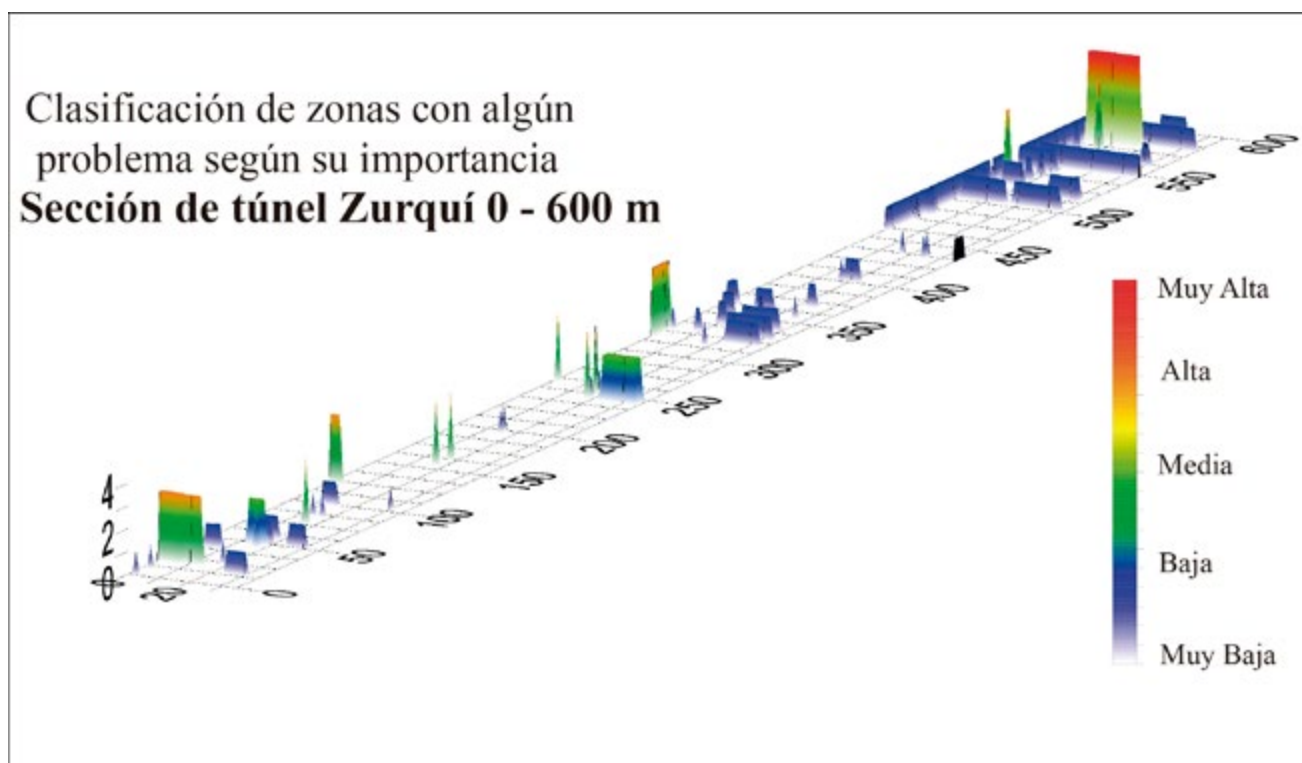


Figura 5. Resumen de la evaluación de túnel Zurquí.

Los resultados que se obtuvieron con el esclerómetro muestran que existen muy pocos sitios donde el concreto lanzado presenta una resistencia inferior de 19,6 MPa (200 kg/cm²), el resto de los ensayos presentan valores mucho más altos, lo que indica que el concreto no presenta problemas y sigue cumpliendo con las especificaciones de diseño. Sin embargo hay que poner atención en los sitios puntuales donde el concreto lanzado se está viendo impactado por eflorescencias y goteo.

Con una cámara térmica de alta resolución, información LiDAR y trabajo de campo se hizo una evaluación específica del sistema eléctrico de iluminación del túnel. El objetivo fue buscar diferencias importantes de temperatura en los cables y lámparas que pudieran indicar algún problema eléctrico que luego devenga en alguna falla en un circuito y la falla en el sistema de iluminación. 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 el levantamiento lidar, pueden servir para planear este tipo de mediciones en inspecciones futuras.

Actualmente esta estructura cuenta con 167 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 que varía de 0,7 metros hasta 1 metro. En la parte central del túnel el espaciamiento puede llegar hasta 14,5 metros (Figura 6).

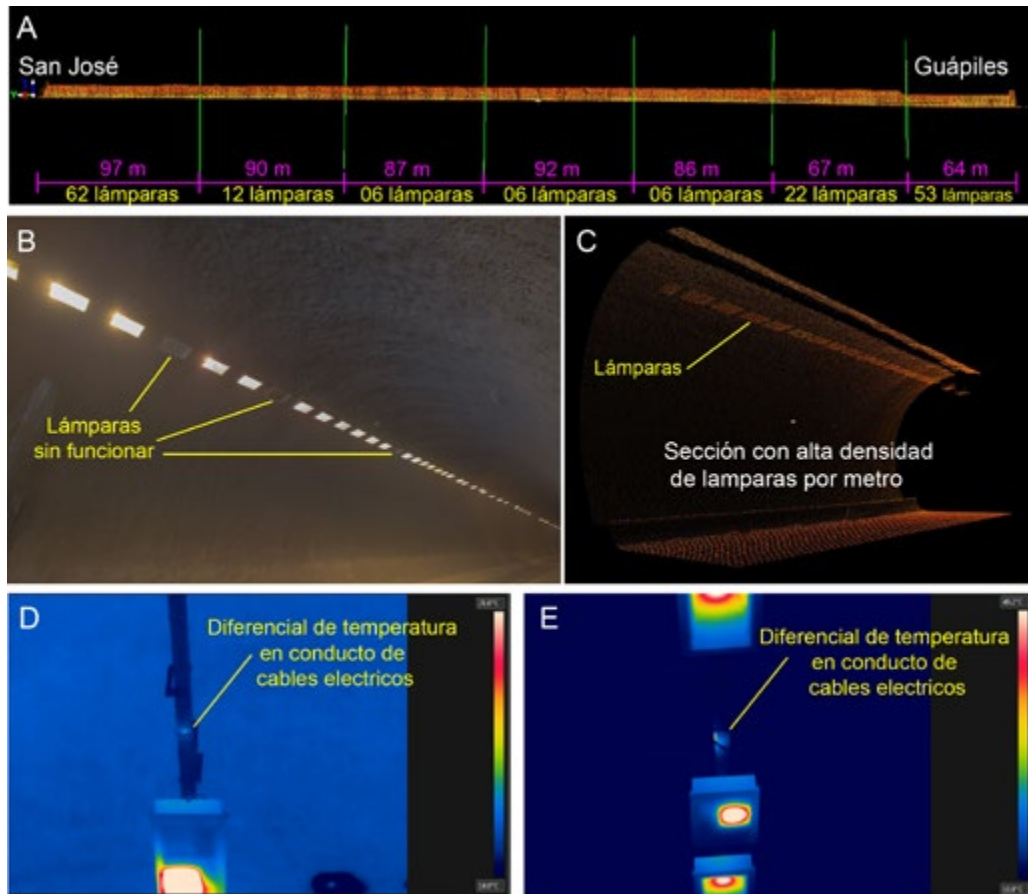


Figura 6. A) Se muestra la densidad de lámparas en el túnel Zurquí por secciones medidas. Se aprecia como hay mayor cantidad de lámparas cerca de las entradas y menor densidad en el centro donde están más espaciadas. B) Fotografía tomada donde se muestran tres lámparas que no están funcionando. C) Se muestra un corte generado con las imágenes lidar donde se aprecia una sección con alta densidad de lámparas. D) y E) Se observa diferencial de temperatura en conducto de cables electricos.

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.

V. CONCLUSIONES

Las evaluaciones en estructuras como túneles son insumos importantes para que la Administración realice el mantenimiento adecuado a este tipo de estructura tan importante para el país. Además se tiene que trabajar en hacer mejoras en la seguridad vial y atención de emergencias dentro del túnel, con el objeto de dar a la obra condiciones mínimas sugeridas internacionalmente para túneles de longitudes similares. Las evaluaciones después de sismos importantes deberían realizarse como parte de un protocolo de estructuras vitales para la red vial nacional. En 34 años de funcionamiento el túnel Zurquí ha experimentado intensidades cercanas a VI, sin embargo en la zona hay fallas locales que podrían generar sismos con intensidades más altas.

La Administración debería contar con un protocolo de evaluación del túnel Zurquí después de cada sismo que genere aceleraciones similares a las que han sido mencionadas en este informe. Ese protocolo debería generar un informe de estado del túnel y que pueda ser utilizado para darle seguimiento en el futuro a esta estructura.

De las evaluaciones realizadas por la UGERVN, se considera que el túnel en general se encuentra en buen estado, sin embargo entre el 2014 y el 2017 se observó un fuerte deterioro en el pavimento dentro del túnel. Este deterioro se relaciona directamente con un problema de infiltración de agua en la parte superior del túnel. Para el momento en que se escribió este boletín, aun no se han intervenido los sitios con problemas que fueron identificados desde el año 2014.

Por los problemas del bacheo, desgaste, desprendimiento y acumulación de humedad que se ha observado en la superficie de ruedo dentro del túnel, se considera que el estado y nota de la sección completa No. 10990 no refleja lo que ocurre en los 592 metros del túnel Zurquí. El origen de los problemas observados se relacionan con el alto contenido de humedad y agua que fluye continuamente sobre la calzada. El agua proviene de goteos intensos en el techo del túnel Zurquí.

La iluminación en el túnel general se considera como buena, sin embargo en esta evaluación el sistema de iluminación se notó más deteriorado que hace dos años. No se puede descuidar este aspecto ya que puede generar un problema de seguridad para los usuarios.

REFERENCIAS

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.

Garro, J., Valverde, C., Naranjo, R., Ruiz, P., Vega, P., Muñoz, J., Vargas S., Villalobos, Castanedo, C., 2015. Evaluación de deterioros del túnel Zurquí, Ruta 32 Carretera Braulio Carrillo, Costa Rica. LM-PI-UGERVN-2-2015 San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.

Jiang, Y., Wang, C., Zhao, X., 2010: Damage assessment of tunnels caused by the 2004 Mid Niigata Prefecture earthquake using Hayashi's quantification theory type II.-Nat Hazards(2010) 53:425-441.DOI 10.1007/S11069-009-9441-9

Montero, W., Alvarado, G., 1995: El terremoto de patillos del 30 de diciembre de 1952(Ms=5,9) y el contexto neotectónico del volcán Irazú, Costa Rica. Rev Geol. Amer. Central, 18, 25-42.

Linkimer, L., 2008. Relationship between peak ground acceleration and Modified Mercalli Intensity in Costa Rica. Rev Geol. Amer. Central, 38, 81-94.

Ruiz, P., Castanedo, C., Garro, J., y Barrantes, R., 2015. Metodología de seguimiento postconstructivo de túneles en ambientes tropicales, caso práctico: Túnel Zurquí, Ruta Nacional No. 32, Costa Rica. XII Congreso Nacional de Geotecnia CONGEO 2015, San José Costa Rica.

Ruiz, P., Valverde, C., Garro, J., Sanabria, J., Naranjo, R., Vega, P., Barrantes, R., 2017. Evaluación del estado del túnel Zurquí en Ruta Nacional No. 32 Braulio Carrillo Año 2017 Costa Rica. LM-PI-UGERVN-008-2017 San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.

Sanabria-Sandino, J., Barrantes-Jiménez, R., & Loría-Salazar, L. G. (2015). Informe de Evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada de Costa Rica Años 2014-2015. San Pedro, San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica

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

Schmidt V., 2010. Avances para estudios del riesgo a escala regional y local: Aplicación a América Central y a la bahía de Cádiz (Sur de España). Tesis Doctoral. Univ Politécnica de Catalunya.

Wang, W., Wang, J., Si, J., Lin, C., Seng, C., Huang, T., 2001: Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi earthquake.-Tunnelling and Underground Space Technology-16(2001) 133-150



LanammeUCR

LABORATORIO NACIONAL DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

PITRA

Programa de
Infraestructura del Transporte

Ing. Luis Guillermo Loría-Salazar, Ph.D.

Coordinador General

Ing. Fabián Elizondo-Arrieta, MBA

Subcoordinador

UNIDADES

Unidad de Auditoría Técnica (UAT)

Ing. Wendy Sequeira-Rojas, M.Sc

Coordinadora

Unidad de Seguridad Vial y Transporte (USVT)

Ing. Diana Jiménez-Romero, M.Sc, MBA

Coordinadora

Unidad de Normativa y Actualización Técnica (UNAT)

Ing. Raquel Arriola-Guzmán

Coordinadora

Unidad de Materiales y Pavimentos (UMP)

Ing. José Pablo Aguiar-Moya, Ph.D.

Coordinador

Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (UGERVN)

Ing. Roy Barrantes-Jiménez

Coordinador

Unidad de Gestión Municipal (UGM)

Lic. Carlos Campos-Cruz

Coordinador

CENTRO DE TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

Diagramación, diseño y control de calidad: Katherine Zúñiga Villaplana / Óscar Rodríguez Quintana

Boletín técnico: EVALUACIÓN DE TÚNELES CARRETEROS EN COSTA RICA: TÚNEL ZURQUÍ, RUTA NACIONAL 32. / Marzo, 2018