



Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales

Programa de Infraestructura del Transporte
Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional

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
Noviembre, 2017



Documento generado con base en el Art. 6, inciso c) de la Ley 8114 y lo señalado en el Capítulo II, Artículo 14 del Reglamento del Art. 6 de la precitada ley, publicada mediante Decreto DE-37016-MOPT.

EVALUACIÓN DEL ESTADO DEL TÚNEL ZURQUÍ EN RUTA NACIONAL No.32 BRAULIO CARRILLO AÑO 2017, COSTA RICA **LM-PI-UGERVN-008-2017**

**Ruiz-Cubillo, Paulo¹; Valverde-Cordero, Cristian²; Garro Francisco²; Sanabria Jairo²,
Naranjo, Ronald²; Vega, Paul³; Barrantes Roy⁴ y Loria-Salazar, Luis Guillermo⁵**

Se presentan los resultados obtenidos en la segunda evaluación del túnel Zurquí realizada por la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional, la primera evaluación se realizó en el año 2014. En general, esta estructura se encuentra en buen estado, sin embargo en esta oportunidad el pavimento dentro del túnel se observó más deteriorado que hace dos años. Este deterioro se atribuye a la presencia continua de agua sobre el pavimento en varios puntos. El agua se origina por un goteo intenso en varios sectores del techo del túnel. De los resultados obtenidos con el esclerómetro se determinó que el concreto lanzado que cubre las paredes del túnel tiene muy pocos sitios donde presentan valores de compresión inferiores 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, este laboratorio ve necesario intervenir varios sitios puntuales donde el concreto lanzado se está viendo impactado por eflorescencias y presencia continua de agua. La iluminación en general sigue siendo buena dentro del túnel. Sin embargo en esta evaluación, se notó el sistema de iluminación más deteriorado que hace dos años. No se puede descuidar este aspecto, ya que podría generar un problema de seguridad para los usuarios.

Se insiste en que por la longitud este túnel y la posibilidad de ocurrencia de accidentes de tránsito que generen incendios, el túnel Zurquí debería de estar equipado 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.

¹ *Geólogo Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional PITRA LanammeUCR*

² *Ingeniero de la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional LanammeUCR*

³ *Geógrafo Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional PITRA LanammeUCR*

⁴ *Coordinador Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional LanammeUCR5*

⁵ *Coordinador General Programa de Infraestructura del Transporte LanammeUCR*

Palabras Clave: Túnel Zurquí, Ruta 32, túnel, evaluación

Referencias

GARRO J.F., 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.

RUIZ, P., CASTANEDO, C., GARRO, J.F., 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.

GARRO J.F., 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.



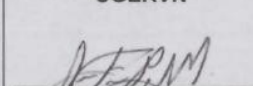

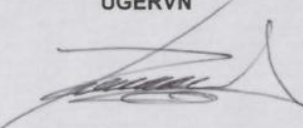
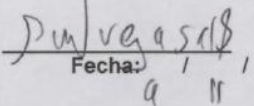
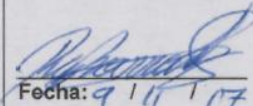
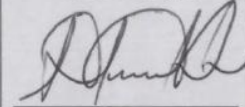
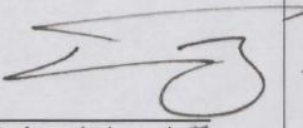
1. Informe LM-PI-UGERVN-008-2017		2. Copia No.1	
3. Título EVALUACIÓN DEL ESTADO DEL TÚNEL ZURQUÍ EN RUTA NACIONAL No.32 BRAULIO CARRILLO AÑO 2017, COSTA RICA		4. Fecha del Informe Noviembre 2017	
5. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440			
6. Notas complementarias No aplica			
7. Resumen Se presentan los resultados obtenidos en la segunda evaluación del túnel Zurquí realizada por la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional, la primera evaluación se realizó en el año 2014. En general, esta estructura se encuentra en buen estado, sin embargo en esta oportunidad el pavimento dentro del túnel se observó más deteriorado que hace dos años. Este deterioro se atribuye a la presencia continua de agua sobre el pavimento en varios puntos. El agua se origina por un goteo intenso en varios sectores del techo del túnel. De los resultados obtenidos con el esclerómetro se determinó que el concreto lanzado que cubre las paredes del túnel tiene muy pocos sitios donde presentan valores de compresión inferiores de 19,6 MPa (200 kg/cm ²), 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, este laboratorio ve necesario intervenir varios sitios puntuales donde el concreto lanzado se está viendo impactado por eflorescencias y presencia continua de agua. La iluminación en general sigue siendo buena dentro del túnel. Sin embargo en esta evaluación, se notó el sistema de iluminación más deteriorado que hace dos años. No se puede descuidar este aspecto, ya que podría generar un problema de seguridad para los usuarios. Se insiste en que por la longitud este túnel y la posibilidad de ocurrencia de accidentes de tránsito que generen incendios, el túnel Zurquí debería de estar equipado 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.			
8. Palabras clave: Túnel Zurquí, Ruta 32, túnel, evaluación		9. Nivel de seguridad: Bajo	10. Núm. de páginas XX
11. Preparado por:			
Geólogo Paulo Ruiz C., Ph.D. UGERVN  Fecha: 9/11/17	Ing. Christian Valverde UGERVN  Fecha: 9/11/17	Ms.C. José Francisco Garro UGERVN  Fecha: 9/11/17	Ing. Jairo Sanabria UGERVN  Fecha: 10/11/17
Ing. Ronald Naranjo U. UGERVN  Fecha: 9/11/17	Geógrafo Paul Vega  Fecha: 9/11/17	12. Ing. Roy Barrantes Coordinador UGERVN  Fecha: 9/11/17	13. Revisado por: Lic. Miguel Chacón A. Asesor Legal  Fecha: 9/11/17
14. Aprobado por: Ing. Guillermo Loría S., Ph.D. Coordinador General PITRA  Fecha: 13/11/17			

TABLA DE CONTENIDO

1. POTESTADES.....	6
2. INTRODUCCIÓN.....	7
3. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	8
4. OBJETIVO GENERAL DEL ESTUDIO.....	10
5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
6. METODOLOGÍA.....	11
7. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL TÚNEL ZURQUÍ 2017.....	17
7.1 Actividad sísmica importante en el país desde la construcción del túnel Zurquí hasta 2012.....	18
7.2 Actividad Sísmica importante cerca del Túnel Zurquí desde la evaluación del 2014 a la fecha ..	23
7.3 Estado de paredes, techo y superficie de ruedo a partir de inspección visual de túnel Zurquí	25
7.3 Resultado de pruebas con esclerometro en paredes de túnel Zurquí	39
7.4 Resultados obtenidos con el escáner LiDAR en la evaluación del túnel Zurquí.....	40
7.5 Resultados de observaciones en Sistema de iluminación del túnel.....	45
7.6 Comparación del estado y medidas de seguridad del túnel Zurquí con estructuras de longitud similar en la región latinoamericana	53
9. CONCLUSIONES.....	60
10. RECOMENDACIONES.....	61
11. AGRADECIMIENTOS.....	63
12. REFERENCIAS.....	63
12. ANEXOS.....	65

1. POTESTADES

El Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), es una dependencia de la Universidad de Costa Rica especializada en la Ingeniería Civil. La ley N°8114 en sus artículos 5 y 6, encomienda al LanammeUCR una serie de funciones en materia de evaluación, fiscalización, asesoría y capacitación, entre otras, para garantizar la máxima eficiencia de la inversión pública en la reconstrucción y conservación de la Red Vial costarricense.

La evaluación e inspección de túneles carreteros después de su construcción es un proceso que se debe ejecutar periódicamente para así asegurarse de la existencia y cumpliendo de 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 sirven como una memoria histórica y técnica de la estructura para poder realizar comparaciones después de terremotos o eventos atmosféricos extremos.

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. Además 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.

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. En este informe se presentan los resultados de la segunda evaluación realizada al túnel por la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (UGERVN) desde el año 2014. En los últimos dos años, 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. Los resultados presentados en este informe son insumos importantes para que la administración realice el mantenimiento adecuado a esta estructura tan importante para el país. También se presentan recomendaciones para 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.

2. INTRODUCCIÓN

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. Fue construida en secciones entre los años 1967 y 1987. A esta ruta se le conoce también con el nombre de Braulio Carrillo en honor al ex Jefe de Estado, quien la había visualizado desde el año 1830 y porque además atraviesa en la sección de montaña el Parque Nacional que lleva el mismo nombre.

En esa sección de montaña entre San Isidro de Heredia y el Cruce de Río Frío se encuentra el túnel Zurquí, que atraviesa el cerro del mismo nombre. Este túnel presenta una longitud de 591,7 m, y un ancho y alto aproximados de 11 y 8 m respectivamente. 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.

En este informe se presentan los resultados de la evaluación realizada por la UGERVN a esta importante estructura el día 16 de marzo del presente año. Esta evaluación es parte del seguimiento que se le ha dado al túnel desde el año de 2014, cuando se realizó la primera evaluación del sitio por parte de la UGERVN. En esta oportunidad, el tránsito estuvo detenido sobre la ruta en la sección de montaña desde las 10:00 pm del día 16 de marzo hasta las 3:00 am del día 17 de marzo. En esta nueva inspección se incluyen nuevas metodologías y equipos especializados como cámaras térmicas de alta resolución y un escáner laser para la evaluación visual de la superficie de ruedo, el concreto de las paredes, techo, drenajes e iluminación entre otros aspectos. Además se realizaron ensayos no destructivos en la paredes cubiertas con concreto lanzado del túnel.

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, logrando salvaguardar la inversión realizada y disminuyendo la vulnerabilidad del túnel ante eventos naturales que puedan afectarlo.

3. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El túnel Zurquí, se encuentra ubicado aproximadamente en el kilómetro 20 de la RN-32 en el distrito Jesús del cantón de Vásquez de Coronado, provincia de San José y dentro de los límites del Parque Nacional Braulio Carrillo (Figura 1).

Información detallada sobre la geomorfología, aspectos geológicos, drenajes superficiales y susceptibilidad al deslizamiento de las laderas y montañas cercanas del sitio donde se ubica el túnel, pueden ser consultados en Garro et al., 2015 y Ruiz et al., 2015.

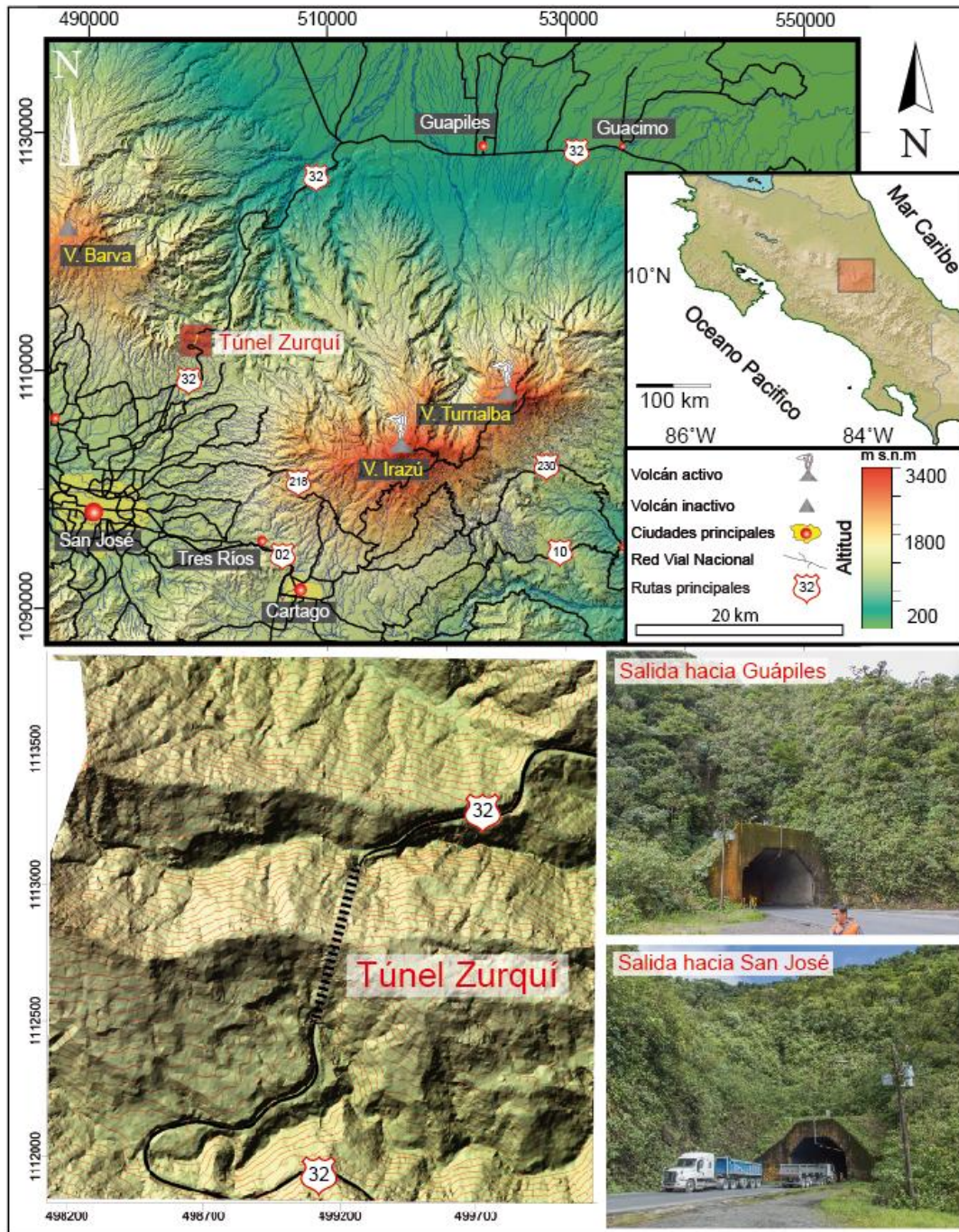


Figura 1. Ubicación de la Ruta Nacional No. 32 en su tramo de montaña y túnel Zurquí.

4. OBJETIVO GENERAL DEL ESTUDIO

Evaluar el estado actual del único túnel carretero que funciona en una ruta nacional en el país. Con esto se estaría dando seguimiento a la evaluación realizada por LanammeUCR en esta estructura en el año 2014 (Garro et al., 2015 & Ruiz et al., 2015), para que existan insumos suficiente que puedan generar una intervención adecuada de mantenimiento de la obra por parte de la administración.

5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar cuál es el estado actual de las paredes y techo del túnel Zurquí. Esto con el fin de evaluar si existe algún impacto en la estructura producto de sismos que han ocurrido en los últimos dos años cerca del túnel.
- Generar un modelo de elevación digital con el escáner LiDAR terrestre de los sitios que actualmente presentan goteo y fisuras en el techo del túnel, para su posterior análisis y determinación del impacto que está generando en el deterioro del calzada.
- Evaluar visualmente la superficie de ruedo del túnel para determinar si existe alguna relación directa entre las fisuras del techo y goteo del túnel con el deterioro de la calzada.
- Evaluar las lámparas de iluminación del túnel con una cámara térmica de alta resolución para determinar la presencia de sitios con anomalías térmicas que puedan generar problemas eléctricos.
- Comparar el estado y medidas de seguridad del túnel Zurquí con estructuras de longitud similar en la región latinoamericana. De esta forma se podrá determinar las carencias que tiene el túnel y que deberían de mejorarse para que al menos esté a un mismo nivel de servicio regional.

6. METODOLOGÍA

En este apartado se resumen las diferentes actividades que se realizaron para la generación de este informe.

Inicialmente se hizo una búsqueda de información de los principales eventos sísmicos que han ocurrido en Costa Rica desde 1984, año en que se construyó este túnel, enfocándose principalmente en los datos de intensidad y aceleraciones sísmicas generados durante estos eventos. Así mismo se recopiló información de los sismos más recientes y cercanos que se dieron desde la evaluación del año 2014. La motivación de la búsqueda de esta información se debe a que en octubre del año 2015 hubo un sismo de magnitud 4.8 Mw muy cercano al túnel que pudo tener impacto en la estructura. Por este motivo se solicitaron los datos oficiales del sismo y réplicas a la Red Sismológica Nacional de la Universidad de Costa Rica (RSN-UCR) y otros se descargaron del sitio web del Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica (LIS-UCR). Los datos sobre este sismo y el análisis de los eventos más importantes que han ocurrido desde la construcción del túnel se presentan más adelante en este informe.

En febrero del presente año se solicitaron los permisos respectivos para realizar un cierre del tramo durante la fecha en la que se programó la evaluación de la estructura. Esto fue coordinado con el CONAVI y la Policía de Tránsito, la cual asistió con el cierre de la ruta entre las 10:00 de la noche y 3:00 de la mañana de los días 16 y 17 de marzo. Se programó hacer la evaluación en ese horario para causar el menor impacto posible en el tránsito de la ruta.

Días previos al cierre y evaluación, se visitó el túnel para obtener fotografías de las entradas y del techo de la estructura con luz natural y así poder observar detalles que con la iluminación artificial no es posible. Además se hicieron las primeras pruebas con la cámara térmica de alta resolución sobre el sistema eléctrico y lámparas dentro del túnel.

Durante la evaluación, se utilizó una convención propia para la nomenclatura y determinación de estacionamientos y lados del túnel. Esta consiste en que siguiendo el sentido de la ruta San José - Limón, el estacionamiento inicial 0+000 está localizado en la entrada del lado de San José y el estacionamiento final 0+591,70 (0+592 redondeado) se encuentra ubicado en la entrada del lado de Limón. Los estacionamientos se hicieron cada 20 m, siguiendo la guía que se había utilizado en la evaluación del año 2014 (Garro et al., 2015).

El día de la evaluación, lo primero que se hizo fue marcar los estacionamientos en el túnel a ambos lados de la vía según la nomenclatura mencionada anteriormente. Para esto se midió la distancia con odómetros y las marcas de los estacionamientos se hicieron con pintura sobre la vía.

La inspección visual se realizó en la totalidad del túnel, incluyendo la pared Lado Derecho (LD), el techo o corona y la pared Lado Izquierdo (LI) utilizando una cuadrícula similar a la del año 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. En la figura 2, en el sentido San José – Limón, 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 rodamiento 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

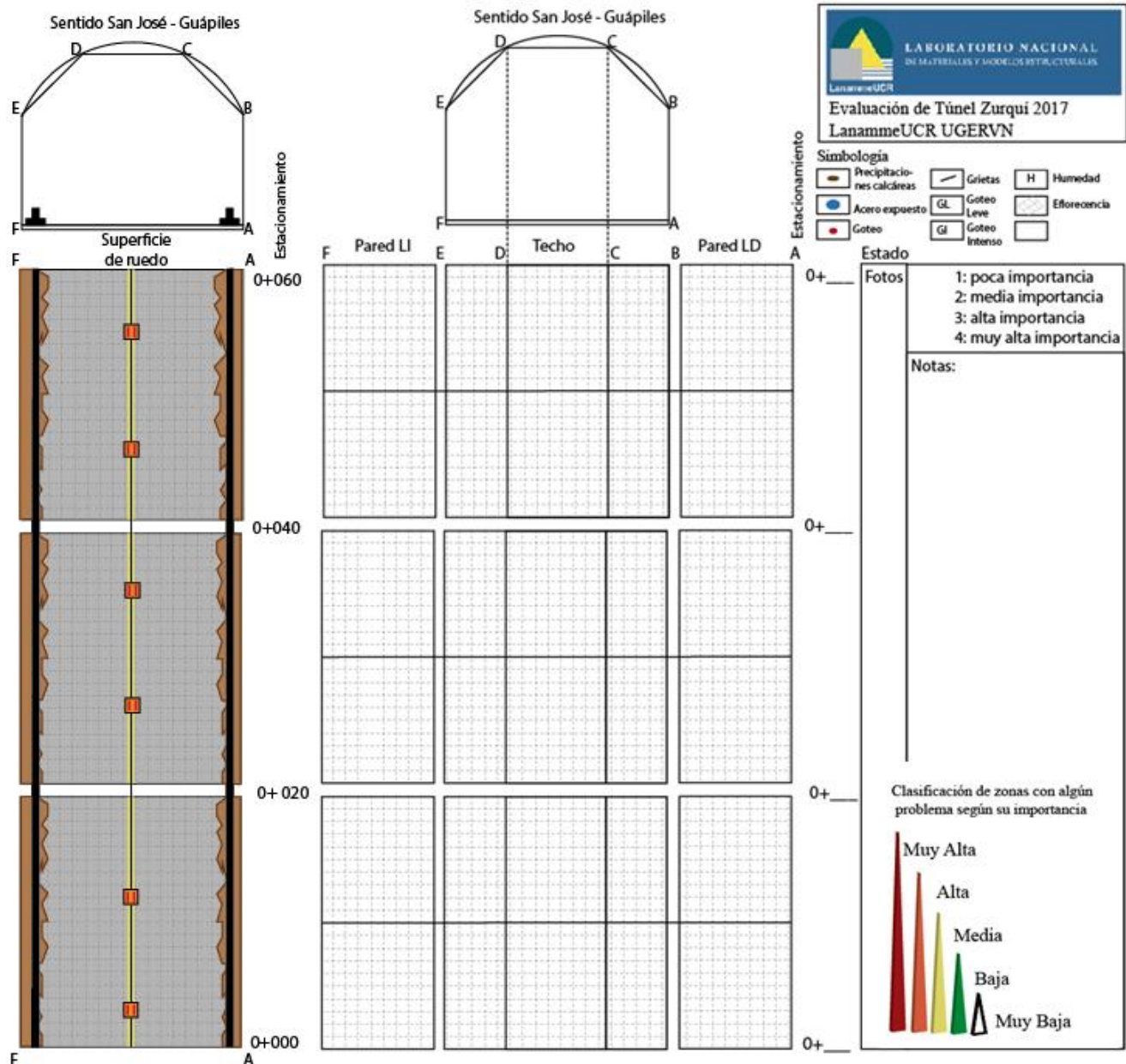


Figura 2. Ejemplo de cuadrículas de evaluación visual para daños en paredes, techo y pavimento del túnel Zurquí.

Las paredes internas y techo del túnel están revestidas con concreto lanzado, con un espesor mínimo de 20 cm (Bolaños y Bruce, 1984). Para mostrar la severidad de los daños se utilizó la misma clasificación propia utilizada en la evaluación del 2015. Esta clasificación está formada por cinco categorías de importancia según los problemas observados (1. Muy

Baja, 2. Baja, 3. Media, 4. Alta y 5 Muy Alta). Mediante el uso de colores blanco, verde, amarillo, anaranjado y rojo, asociados a las categorías antes mencionadas, se muestran las zonas con diferencias en la severidad de los problemas detectados, este esquema se presenta en la Figura 2. Entonces, las zonas clasificadas como Muy Alta, presentan problemas como: goteo intenso, concreto lanzado degradado, exposición de acero o malla electrosoldada, falta de iluminación entre otros. Esta clasificación indican que una zona como la descrita anteriormente requieren atención inmediata para evitar mayores problemas y reducir su posible propagación. Por el contrario, Las zonas clasificadas como Muy Baja presentan algún problema, pero es mínimo como por ejemplo, manchas tenues por eflorescencias. Zonas de este tipo no hay que intervenirlas pero sí darles seguimiento en futuras inspecciones. Las zonas que no están clasificadas dentro de estas 5 categorías no presentan problema visual.

En cada uno de los segmentos se evaluaron aspectos como el nivel de humedad en las paredes (leve, moderado o intenso), drenajes de agua de escorrentía que estuvieran funcionando apropiadamente, salidas de agua en forma de goteos o chorros en el techo y/o paredes, presencia de eflorescencia, 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). Esta inspección se realizó a mediados del mes marzo del presente año, esto corresponde con el final de la estación seca, por lo que los drenajes no estaban con tanta agua como cuando se hizo la evaluación de noviembre del 2014 cuando era casi el final de la época lluviosa. Esta situación se había contemplado en el informe de evaluación anterior (Garro et al., 2015).

Se realizaron pruebas con esclerómetro en las paredes con concreto lanzado en cada uno de los estacionamientos definidos para la inspección del túnel. En la evaluación del año 2014 (Garro et al., 2015) solamente se realizaron mediciones en la pared del LI, en esta oportunidad, los puntos donde se hicieron las pruebas también incluyen el concreto lanzado de la pared del LD. Los ensayos para evaluar el estado del concreto lanzado se realizaron en

intervalos de 20 metros, a una altura aproximada de 1,5 metros, con 10 mediciones en cada punto para luego utilizar el dato promedio. 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, y el error humano. Según las especificaciones señaladas por (Bolaños y Bruce, 1984), el concreto lanzado que se utilizó en túnel Zurquí debe de tener una resistencia mínima de 19,6 MPa (200 kg/cm²).

Se realizó una evaluación de las lámparas de iluminación con una cámara térmica de alta resolución, así como un conteo en el sitio del total de lámparas y se clasificaron según las que no funcionan o tenían menor intensidad o intermitencia de luz. Con la cámara térmica, se tomaron fotografías y videos del sistema de iluminación así como de los drenajes laterales y algunas paredes del túnel.

Se hizo un levantamiento LiDAR de tres secciones del túnel en los siguientes estacionamientos: a.) 0+160, b.) 0+340 y c.) 0+420). Estos tres puntos fueron seleccionados con base en los resultados de la inspección del año 2014, así como lo observado en las visitas previas al túnel que se realizaron en horario diurno. En estos sitios, se hizo el levantamiento de alta resolución con el escáner terrestre LiDAR para así poder generar un modelo de elevación digital de la sección que presenta la afectación en el túnel y también comprobar el impacto de este goteo en la superficie de ruedo.

Con el objetivo de comparar otros túneles de la región y el túnel Zurquí en cuanto a estructura, estado, mantenimiento, medidas para la respuesta a emergencias, se realizó un catálogo de estructuras subterráneas, para así facilitar la comparación y evaluaciones respectivas. La información de los túneles con que se hizo la comparación se obtuvo a partir de sitios web de instituciones gubernamentales a cargo de las redes viales, artículos de prensa, sitios turísticos y videos subidos a internet por usuarios. De estos sitios se logró obtener en su mayoría las dimensiones de los túneles, sus nombres, número de carriles,

autopistas a las que pertenecen e imágenes de estos. De ciertos túneles no se logró obtener el ancho específico por lo que se asume un ancho de 3,65m para cada carril por ser un ancho ideal (Coquand, 1965).



7. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL TÚNEL ZURQUÍ 2017

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.

Se presentan los datos indicadores funcionales y estructurales de la condición de pavimento de la sección No. 10990 que incluye el túnel Zurquí, estos indicadores son medidos bianualmente por la UGERVN (Tabla 1). El indicador de Índice de Rugosidad Internacional (IRI) mide como su nombre lo dice la rugosidad 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. Comparación de indicadores del tramo No. 10990 de la RN-32 donde se encuentra el túnel Zurquí. Datos correspondientes a mediciones realizadas por LanammeUCR entre 2013-2016. * (Sanabria-Sandino, Barrantes-Jiménez, & Loría-Salazar, 2015)

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	₡ 7,41 millones /km	*	₡37,28 millones /km	

Con respecto a la evaluación de la sección No. 10990 realizada por LanammeUCR entre el 2015 y el 2016, las mediciones 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 (Tabla 1). La tasa de inversión aumento considerablemente pasando de ₡ 7,41 millones/km a ₡ 37,28 millones/km (Tabla 1).

Dentro de los resultados de la inspección visual y las partes del túnel que se levantaron con el escáner LiDAR, se presentan observaciones sobre el estado de la superficie de ruedo dentro de esta estructura. Más adelante en este trabajo se determina si el estado de la sección No. 10990 refleja el estado del pavimento en los 592 m del túnel Zurquí.

7.1 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 2.



Tabla 2. Resumen de los principales eventos sísmicos que han ocurrido en el país después de la construcción del túnel Zurquí y que hayan presentado una intensidad Mercalli Modificada MM igual o superior a III en el sector de montaña de la RN-32. Los resultados de PGA para la zona de montaña de la RN-32 provienen de las cuatro ecuaciones propuestas por Linkimer 2008. En los anexos se muestran los mapas con la ubicación e intensidades de cada uno de estos sismos y su relación con la ubicación 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 d 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 volcán Irazú, Costa Rica

En la tabla anterior se incluyen los datos estimados por Montero & Alvarado (1995) para el sismo del 30 de diciembre de 1952, a este evento se le conoce con el nombre de Terremoto de Patillos. Aunque ocurrió mucho tiempo antes de la construcción del túnel Zurquí, es el evento histórico más cercano al túnel y que ha desarrollado mayores intensidades (VII) y que corresponderían con aceleraciones entre 268,0 y 146,7 cm/s^2 .

Según los datos recopilados en la Tabla 2, 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 con valores de PGA_{max} de 36,0 - 80,3 cm/s^2 (Tabla 2). 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. 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. 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/s² (Tabla 2). 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 transitaran dentro del túnel en ese momento. Es por eso que se buscó información de casos de túneles dañados a nivel global en sismos de magnitud similar a los que el Zurquí se ha visto expuesto en su historia.

Wang et al (2001) evalúan los daños ocasionados a túneles en montaña por el sismo de Chi-Chi, Taiwan en el año 1999, que tuvo una magnitud Ms de 7,6 y una profundidad aproximada de 7,5 km. Para esta evaluación realizaron un inventario de daños en 57 túneles afectados por el sismo, que presentaron una intensidad de VII en la escala JMA (Japan Meteorological Agency) con aceleraciones de 250 a >400 gal (el túnel Zurquí pudo verse sujeto a 230 gal en el sismo de Patillos en 1952). De estos 57 túneles, 43 presentaron fracturas en el revestimiento, 16 fallos en los portales, 13 mostraron desprendimiento del revestimiento y una cantidad menor a 10 túneles presentaron desplazamiento del revestimiento, caída de rocas, colapso del túnel o fractura del pavimento.

De la misma manera Jiang et al (2010) realizan una evaluación similar para el sismo de Niigata del 2004 el cual tuvo una magnitud (Mw) de 6,6 con una profundidad aproximada de 13 km, en este estudio analizaron los daños a 138 túneles (ferroviarios, carreteros e hidroeléctricos). De estos 138 túneles, un total de 49 presentaron daños en su revestimiento (principal y mayoritariamente fisuramiento y spalling), con la particularidad de que estos túneles se encuentran a menos de 20 km de distancia al epicentro (cabe recordar que el Zurquí se encuentra a aproximadamente 16 km de donde se supone estuvo localizado el epicentro del sismo de Patillos) y si bien los más cercanos presentaron los daños más

significativos, hubo túneles en el mismo radio que no se vieron tan afectados (Jiang et al, 2010).

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.

7.2 Actividad Sísmica importante cerca del Túnel Zurquí desde la evaluación del 2014 a la fecha

Según datos obtenidos por solicitud a la Red Sismológica Nacional de la Universidad de Costa Rica (RSN-UCR), el día 31 de octubre del año 2015 a las 9:10 am ocurrió un sismo superficial (profundidad de 3,3 km) con epicentro (Lat 10.171 N, Lon -83.982 W) a una distancia de 12,2 km al norte del túnel Zurquí y con una magnitud de 4,8 Mw (Figura 3A). Este sismo fue generado por una falla local de desplazamiento de rumbo de tipo siniestral (movimiento hacia la izquierda de uno de sus bloques) con rumbo N30E y de una falla dextral (movimiento hacia la derecha de uno de sus bloques) con rumbo N60W, ambas con planos de falla cercanos a la vertical (Figura 3B). Según los datos suministrados, se presentaron varias réplicas en la zona después del evento principal (Figura 3A).

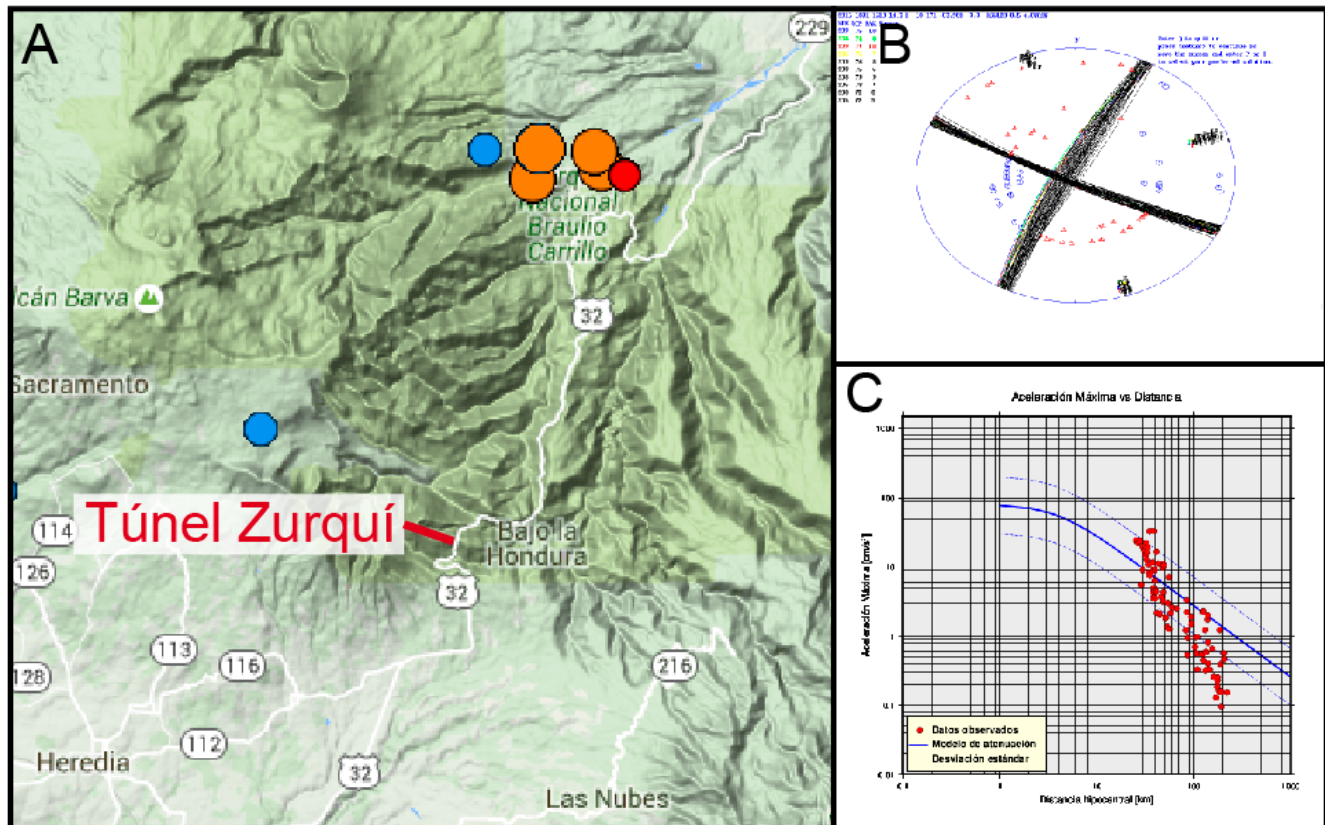


Figura 3. A. Ubicación de sismos registrados cerca del túnel Zurquí el 31 de octubre del 2015. B. Mecanismo focal que muestra el tipo de falla que generó el evento principal. C. Datos de PGAMax observados en las estaciones del LIS-UCR (Puntos rojos) en la relación al modelo de atenuación (línea azul) y su desviación estándar.

Utilizando los datos del sismo del 31 de octubre del 2015 aportados por la RSN-UCR y la fórmula de atenuación de sísmica de Schmidt (2010) para sismos locales en Costa Rica, se puede estimar que la aceleración pico máxima en el epicentro pudo ser de $95,877 \text{ cm/s}^2$ y que a una distancia de 12,2 km donde estaría ubicado el túnel Zurquí el dato para PGA_{\max} pudo ser de $35,62 \text{ cm/s}^2$, lo que corresponde con una intensidad (MM) de V según rango de intensidades (MM) de Linkimer (2008). Estos datos estimados son muy similares a los que se han generado en otros eventos en el pasado y que fueron descritos anteriormente para la sección de montaña de la RN-32.

El valor de PGA_{max} que se ha calculado para este informe, es muy cercano al dato máximo registrado por los acelerógrafos del Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS-UCR), que fue de 32.98 cm/s^2 en la estación de San Rafael de Oreamuno en Cartago. Este valor es equivalente a una intensidad (MM) de IV.

En el LanammeUCR actualmente se está trabajando junto con el LIS-UCR en un proyecto de investigación de densificación de la red de acelerógrafos en las áreas cercanas a puentes importantes. El túnel Zurquí se vería favorecido por este proyecto debido a que posiblemente se instale una estación en la caseta de guardaparques en Quebrada González, cerca del puente de Río Sucio. Con esta estación se podrían tener datos más precisos sobre las aceleraciones a las que se someten estas estructuras tan importantes, datos que serían de gran utilidad para determinar daños en el túnel originados por sismos.

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.

7.3 Estado de paredes, techo y superficie de ruedo a partir de inspección visual de túnel Zurquí

A continuación se detallan los hallazgos encontrados en las paredes y techo del túnel en cada una de las secciones en que fue dividido. En los anexos se presentan los datos recopilados en cada sección. Se incluyen los gráficos de los datos generados con el esclerómetro en cada una de las secciones. En otra plantilla separada se muestran los datos sobre el estado del pavimento dentro del túnel. Estas plantillas y los resultados de la evolución de las paredes y techo así como la calzada se encuentran en los anexos

- *Sección 1, est. 0+00 a 0+60*

En esta sección se encontraron principalmente eflorescencias o precipitaciones de sales en las salidas de los drenajes localizados en las paredes del túnel, principalmente del lado derecho (Fig. 4). Se determinó que estas sales presentan una composición calcárea debido a su alta reacción con HCl. La mayor acumulación de sales se da en la pared LI, cerca del estacionamiento 0 + 020. El estado de este sitio no ha variado con respecto a la evaluación del 2014. Los espesores de las sales en las paredes van desde milimétrico hasta de algunos pocos centímetros (~2 cm). Debido a la extensión y espesor de esta acumulación, esta zona se clasifica como de importancia media.

En el estacionamiento 0 + 010 de la pared LI se observó un punto que presenta acero expuesto de la malla electrosoldada; sin embargo es un punto aislado que no presenta otro tipo de problemas.



Figura 4. Eflorescencias o precipitaciones de sales, estacionamiento 0+020

Hacia el final de esta sección (cerca del estacionamiento 0 + 055 m) en la parte central del techo, se ubica una zona donde hay concentración de sales y goteo leve. Esta zona se clasifica como de importancia baja y media. En varios puntos de esta sección se observaron goteos, predominantemente en la pared LI o en la parte central del techo del túnel. Tanto al lado derecho como izquierdo hay humedad en el borde inferior de las paredes.

En toda esta sección la sección, 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 (Figura 5).



Figura 5. Acumulación de sedimentos en los bordes y falta de captaluces.

Los resultados de las pruebas con el esclerómetro en esta sección muestran valores superiores del lado izquierdo que del lado derecho. En ambos casos superan los 19,6 Mpa y llegan hasta los 68 Mpa.

- *Sección 2, est. 0+60 a 0+120*

En esta sección se observaron goteos, ubicados principalmente en la parte central del techo del túnel entre los estacionamientos 0+075 y 0+105 m desde la entrada (lado San José). Existe una pequeña zona ubicada cerca del estacionamiento de 0+100 m, donde el techo presenta acumulación de sales. La clasificación de importancia de los problemas observados en esta sección varía entre muy baja a media.

En esta sección, sobre el pavimento hay faltante de captaluces y sedimentos acumulados a los lados de la vía. Entre los estacionamientos 0+075 y 0+105 m hay acumulación de agua en la superficie por el goteo proveniente del techo. Debido a esta situación cerca del estacionamiento 0+080 se ha generado desprendimiento de la capa asfáltica Figura 6.



Figura 6. Acumulación de agua en la vía por goteo y falta de captaluces.

Los resultados de las pruebas con el esclerómetro en esta sección muestran al igual que en la sección anterior valores superiores del lado izquierdo que del lado derecho. Solamente una de las mediciones no llega a los 19,6 Mpa, el valor máximo registrado es de 44 Mpa.

- *Sección 3, est. 0+120 a 0+180*

En esta sección se observaron principalmente goteos y acumulación de sales. En la pared LI en el estacionamiento 0+122 se observó un drenaje con goteo intenso y acumulación de sales calcáreas en zonas por las que escurre el agua. La colmatación de sedimentos entre la parte inferior de las paredes del túnel y la barrera de tipo New Jersey que hay a los lados de la carretera, impide el manejo adecuado de aguas para permitir que la misma drene de forma

eficiente. Hacia el final de esta sección, en la parte central del techo, se observaron varios puntos con goteo intenso. Cerca del estacionamiento 0 + 162 m en el techo hay un tubo por el que sale agua continuamente. La clasificación de importancia de los problemas observados en esta sección varía entre muy baja hasta alta.

Sobre la vía en toda esta sección hay humedad en el pavimento, y acumulación de agua en la parte central, lo que indica que falta bombeo para dirigir el agua hacia los lados. El pavimento del lado izquierdo presenta desprendimientos, que en la parte central en el estacionamiento 0+160 es más severo y se ha formado un hueco. Igual que en el resto de las secciones faltan los captaluces y hay sedimentación a los lados de la vía.

Los resultados de las pruebas con el esclerómetro en esta sección muestran valores superiores del lado izquierdo que del lado derecho. En ambos casos superan los 19,6 Mpa y llegan hasta los 66 Mpa (Fig. 7).

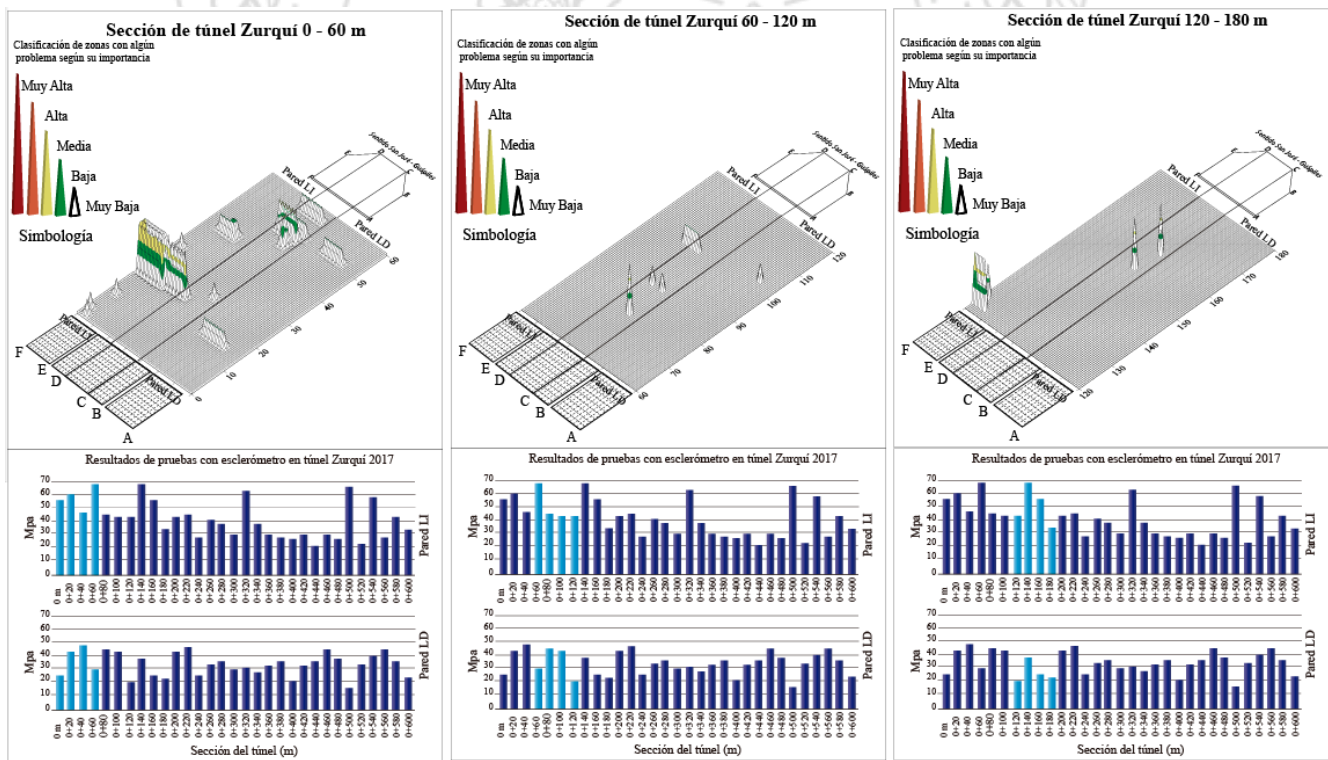


Figura 7. Resultados de evaluación de túnel Zurquí. Secciones desde 0 m a 180m.

- *Sección 4, est. 0+180 a 0+240*

Se detectaron dos sitios que presentan goteo leve desde las lámparas ubicadas en el techo del túnel. Estos sitios fueron clasificados como zonas con importancia muy baja en la evaluación realizada en el 2014. Sin embargo por la cantidad de agua que fue observada saliendo en la evaluación realizada este año, el goteo que se está dando cerca del estacionamiento 0 + 198 se categoriza como de muy alta importancia.

En esta sección se observó que sobre el pavimento hay desprendimiento, humedad y agua en la parte central de la vía y falta de captaluces (Fig. 8).



Figura 8. Acumulación de agua en parte central la vía por goteo y falta de captaluces. También se observa el desgaste de la capa asfáltica

Los resultados de las pruebas con el esclerómetro en esta sección muestran valores superiores o muy similares del lado izquierdo que del lado derecho. En ambos casos superan los 19,6 Mpa y llegan hasta los 46 Mpa.

- *Sección 5, est. 0+240 a 0+300*

En este tramo, los sitios que presentan alguna afectación están ubicados al inicio, entre los estacionamiento 0+245 y 0+250, específicamente en la pared LD y en el techo, corresponden con acumulación de sales calcáreas en dicha pared y goteos de leves a intensos en la superficie del techo del túnel, lo cual se clasifica como de importancia baja hasta alta (un grado mayor que en el año 2014). En el estacionamiento 0+250 se ubicó un tubo de los que sostienen el sistema de iluminación que está colgando (Figura 9).



Figura 9. El tubo que sostienen el sistema de iluminación en este sector es colgando. En la pared LD y en el techo, se pueden observar eflorescencias.

En esta sección hay desprendimiento de agregados y falta de captaluces

Los resultados de las pruebas con el esclerómetro en esta sección muestran valores superiores o muy similares del lado izquierdo que del lado derecho. En ambos casos superan los 19,6 Mpa y llegan hasta los 40 Mpa.

- Sección 6, est. 0+300 a 0+360

Esta sección presenta varias zonas en las paredes LI y LD y en el techo con humedad, goteo y acumulación de sales, especialmente entre los estacionamientos 0+320 y 0+330. Esta zona fue calificada con importancia baja en esta evaluación, aunque en el año 2014 el goteo e intensidad era mayor. Entre el estacionamiento 0+340 al 0+360, en el techo y la zona central, existen líneas de eflorescencia y algunos puntos con goteo leve. En el sitio 0 + 350 en el techo hay un punto con goteo de muy alta importancia (Figura 10).



Figura 10. Eflorescencia y puntos con goteo

Hay desprendimiento entre los estacionamientos 0+ 300 y 0+320, y como en las secciones anteriores, faltan captaluces en la carpeta.

Los resultados de las pruebas con el esclerómetro en esta sección muestran valores superiores o muy similares del lado izquierdo que del lado derecho. En ambos casos superan los 19,6 Mpa y llegan hasta los 62 Mpa (Fig. 11).

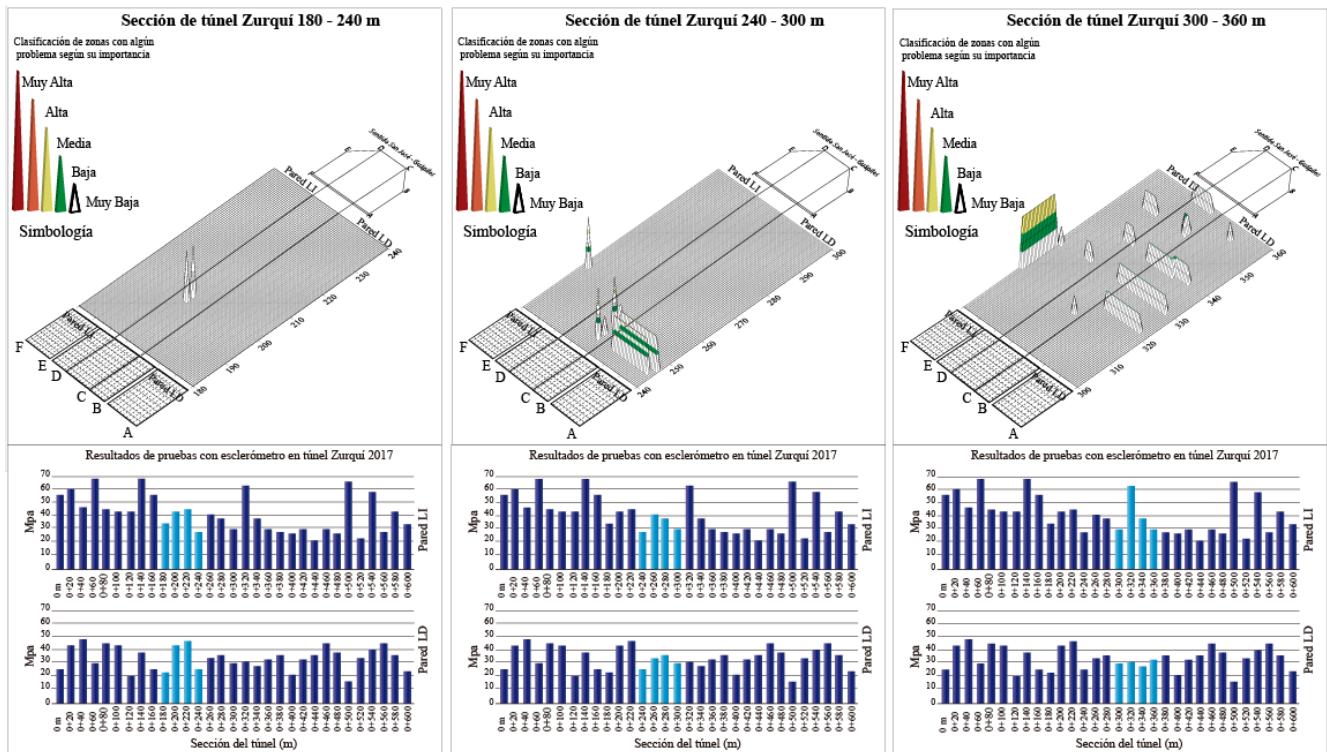


Figura 11. Resultados de evaluación de túnel Zurquí. Secciones desde 180 m a 360m.

- Sección 7, est. 0+360 a 0+420

Se observaron cuatro puntos que presentan humedad y goteo leve, pero con moderada acumulación de sales (Figura 12).

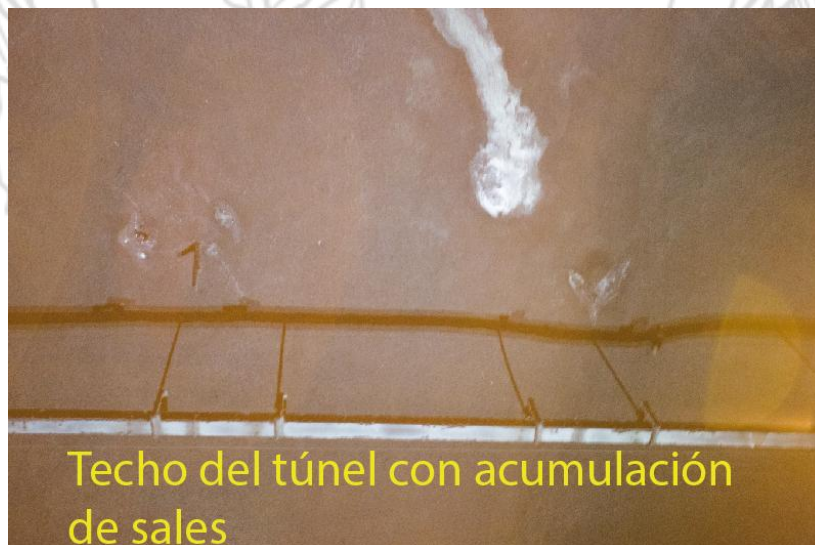


Figura 12. Eflorescencia y puntos con goteo

Todos fueron categorizados de muy baja importancia. En esta sección no se observaron problemas importantes en la bóveda. Sin embargo, en la carpeta hay desprendimiento de agregados en el lado derecho, así como un hueco y una parte con bacheo, con ausencia de captaluces (Figura 13).



Desprendimiento de asfalto (hueco)

Figura 13. Desprendimiento de pavimento

Los resultados de las pruebas con el esclerómetro en esta sección muestran valores superiores o muy similares del lado izquierdo que del lado derecho. En ambos casos superan los 19,6 Mpa y llegan hasta los 45 Mpa.

- Sección 8, est. 0+420 a 0+480

Entre los estacionamientos 0+460 a 0+480, toda la sección inferior de la pared LI presenta humedad, situación que es agravada por la gran acumulación de sedimentos en la cuneta que impiden el flujo natural del agua. Del lado derecho la humedad se presenta desde el estacionamiento 0+ 440 a 0 +480 m. En el techo hay algunas acumulaciones de sal y goteo leve de poca a media importancia.

En esta sección hay zonas con desprendimiento de agregados, bacheo, huecos y acumulación de agua sobre el pavimento.

Los resultados de las pruebas con el esclerómetro en esta sección muestran valores superiores o muy similares del lado derecho que del lado izquierdo. En ambos casos superan los 19,6 Mpa y llegan hasta los 45 Mpa.

Sección 9, est. 0+480 a 0+540

En esta sección se da una continuación de los problemas de humedad y goteo en la parte inferior de la pared LI. Su extensión es de 50 m aproximadamente desde el estacionamiento 0+480 al 0+530. Esta zona fue categorizada con importancia media. En el estacionamiento 0+530 existe un sitio con flujo de agua constante que sale por un orificio en el concreto lanzado y donde la malla electrosoldada se encuentra expuesta, categorizándose este sitio como de importancia alta (Fig. 14).



Figura 14. Malla expuesta en sitio con goteo estacionamiento 0+530

Cerca del estacionamiento 0+505, en el techo y extendiéndose hacia las paredes LI y LD, hay eflorescencia y goteo, que hicieron que esta zona fuera categorizada con importancia media. En esta sección faltan captaluces.

Los resultados de las pruebas con el esclerómetro en esta sección muestran valores superiores o muy similares del lado izquierdo que del lado derecho. Una medición del lado derecho dio inferior 14 Mpa, el resto de las mediciones superan los 19,6 Mpa y llegan hasta los 66 Mpa (Fig. 15).

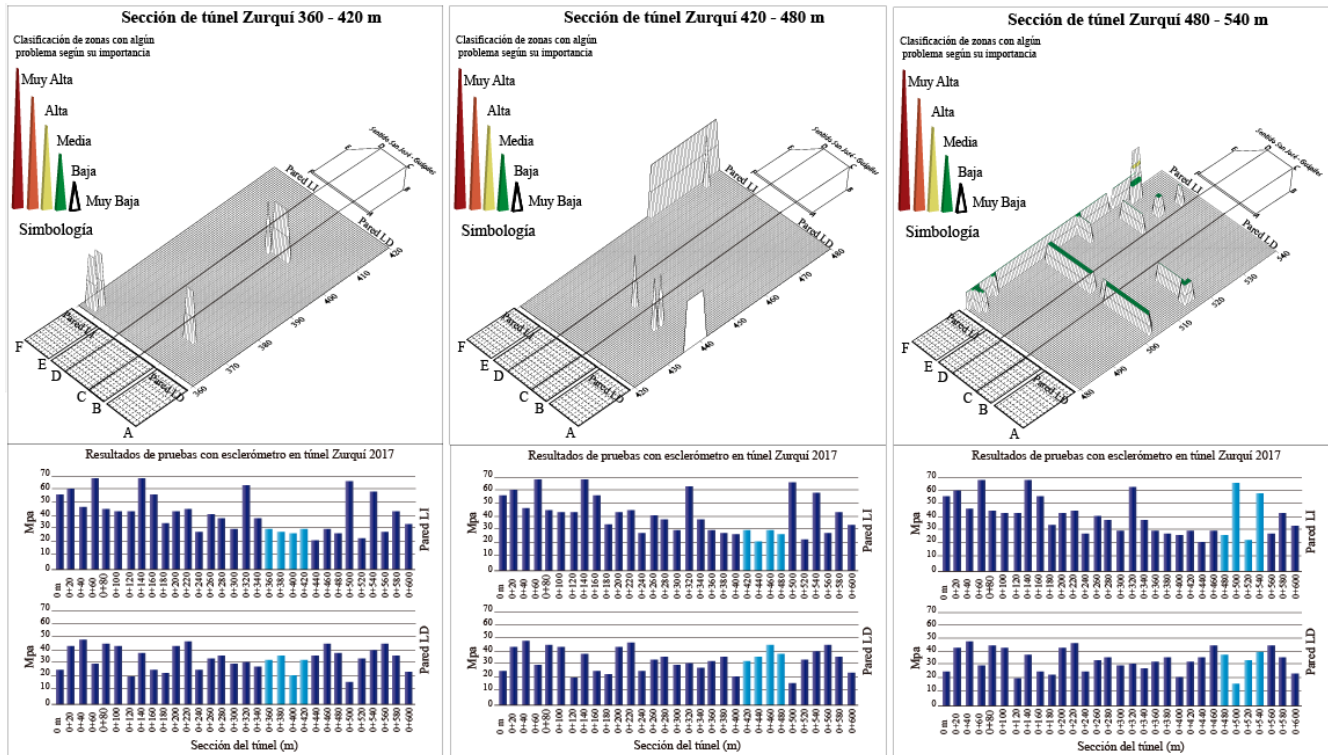


Figura 15. Resultados de evaluación de túnel Zurquí. Secciones desde 360 m a 540m.

- Sección 10, est. 0+540 a 0+592 (final)

Esta sección presenta problemas de humedad prácticamente en toda su extensión, sobre todo en la parte inferior de la pared LI. Al igual que en secciones anteriores, la gran acumulación de sedimentos en la cuneta impide el flujo normal de aguas. En el estacionamiento 0+580 (punto donde la sección interna del túnel pasa de concreto lanzado a arcos de concreto), se observó humedad, acumulación de sales y acero expuesto en la pared LI y el techo (Fig. 16). Esta zona se clasifica por tanto con importancia alta según la categorización propuesta. No se observaron problemas evidentes en la capa asfáltica pero si hay falta de captaluces. Hacia el final la regleta metálica que sostiene las lámparas de iluminación está desprendida y sin lámparas (Fig. 16).



Figura 16. Regleta que sostiene lámparas desprendida y sin estas.

Los resultados de las pruebas con el esclerómetro en esta sección muestran valores superiores o muy similares del lado izquierdo que del lado derecho. En ambos casos superan los 19,6 Mpa y llegan hasta los 58 Mpa (Fig. 17).

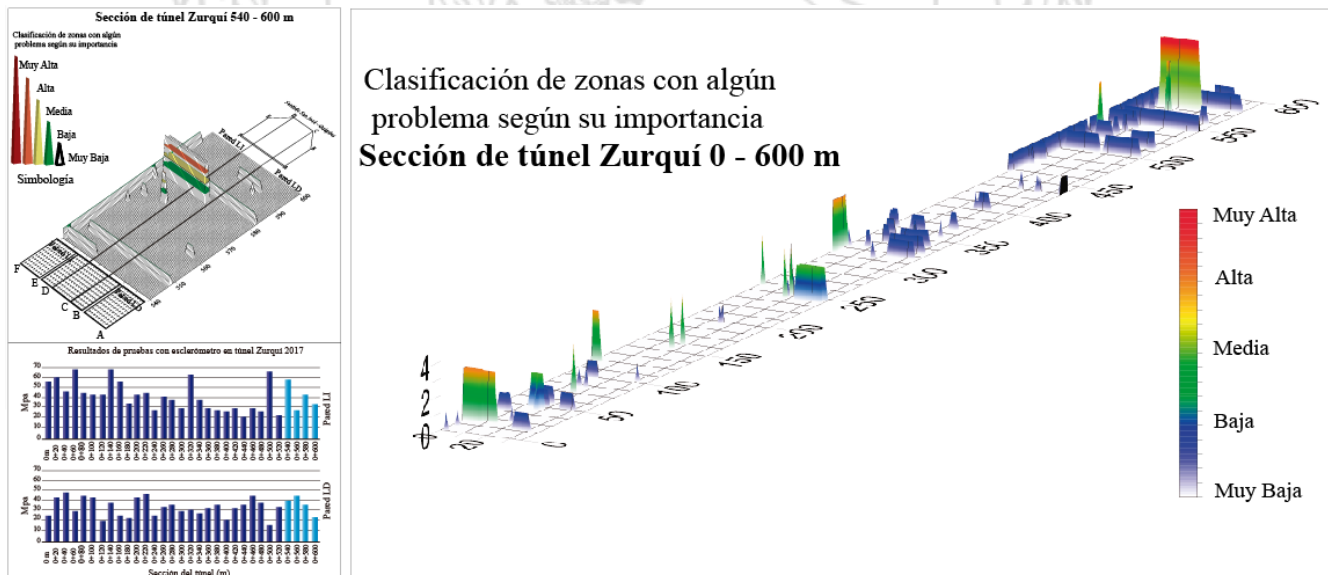


Figura 17. Resultados de evaluación de la sección del túnel Zurquí desde 540 a 600. Resumen de la evaluación de todo el túnel. Se nota como la parte final central de la galería es la que más presenta problemas

7.3 Resultado de pruebas con esclerómetro en paredes de túnel Zurquí

Los resultados obtenidos fueron mencionados junto con la evaluación y caracterización de cada una de las secciones del túnel. Aquí se presenta una figura con los resultados de este ensayo. 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, y el error humano. El concreto lanzado usado en este túnel debe tener una resistencia mínima de 19,6 MPa (200 kg/cm²) señalada en las especificaciones (Bolaños y Bruce, 1984). En la figura 18 se presentan los resultados obtenidos en las pruebas realizadas durante esta evaluación.

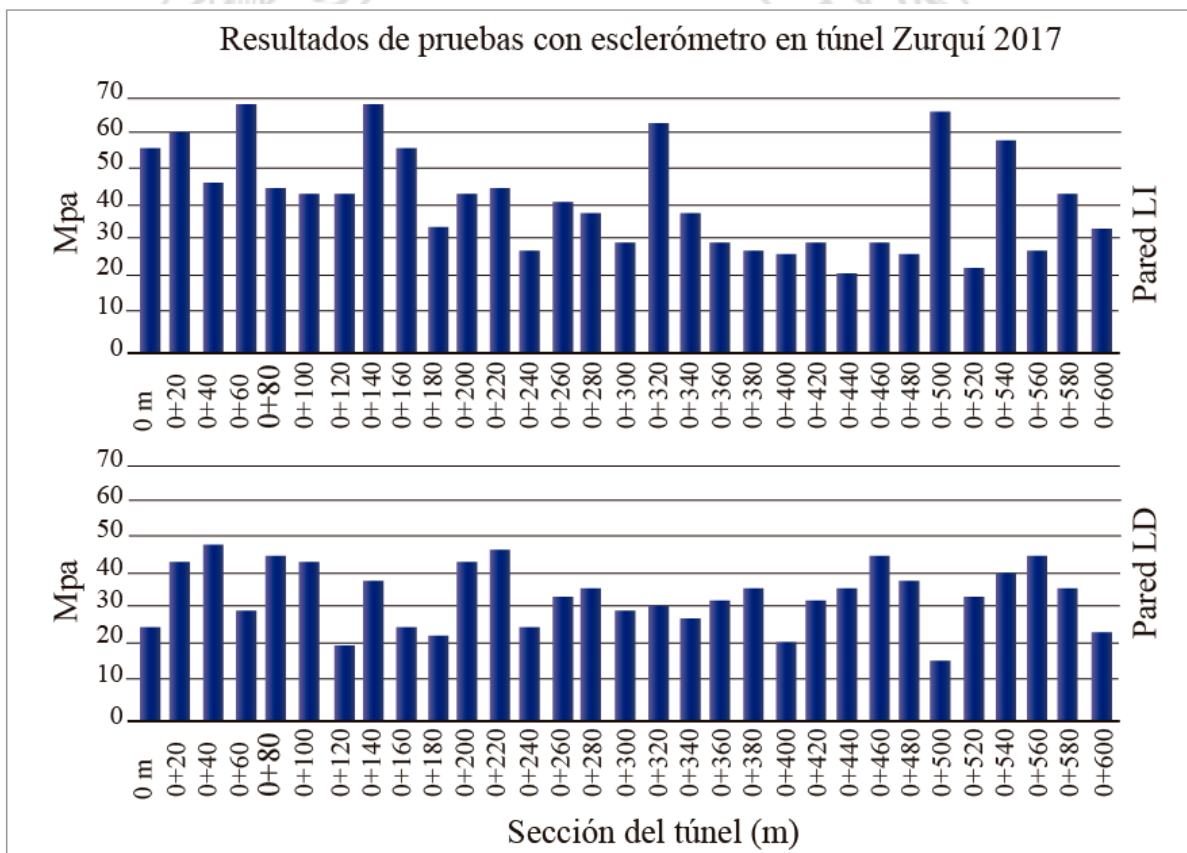


Figura 18. Se muestran los resultados del ensayo con esclerómetro en las paredes del túnel Zurquí.

De las pruebas realizadas a lo largo del túnel se puede determinar que existen muy pocos sitios que presentan una resistencia inferior de 19,6 MPa (200 kg/cm²). Los valores obtenidos son muy similares a ambos lados del túnel para cada uno de los estacionamientos donde se realizó la prueba. Esto indica que la prueba se realizó correctamente y que el estado del concreto lanzado en las paredes del túnel es bueno. Sin embargo hay que poner atención en los sitios puntuales donde el concreto lanzado se está viendo impactado por eflorescencias y goteo.

7.4 Resultados obtenidos con el escáner LiDAR en la evaluación del túnel Zurquí

A diferencia de la primera evaluación, donde se utilizó el escáner para levantar la totalidad del túnel, este año se utilizó únicamente en aquellos puntos donde se dan problemas por infiltración de aguas en las paredes y/o techo de la obra. En total, se analizaron 3 puntos, que corresponden a las estaciones 0+160, 0+340 y 0+420 (sentido San José – Limón), de tal manera que fue posible obtener las áreas de pavimento afectadas por la humedad, así como comprobar las medidas de convergencia de los ganchos que se encuentran en las cercanías a dichos puntos, y comparar los resultados con aquellos obtenidos en el año 2015.

En cuanto a los problemas por humedad, a continuación se indican los hallazgos por estación:

- Est. 0+160: Se detectaron desprendimientos de pavimento en la carpeta producto de la humedad. El escaner LiDAR logró registrar la zanja en el centro de la carpeta con dimensiones de aproximadamente 40 metros de largo y 1,5 cm de profundidad, que canaliza el agua por el centro de la misma. Las cunetas en este sitio presentan acumulación de sedimentos que le restan funcionalidad (Fig. 19).

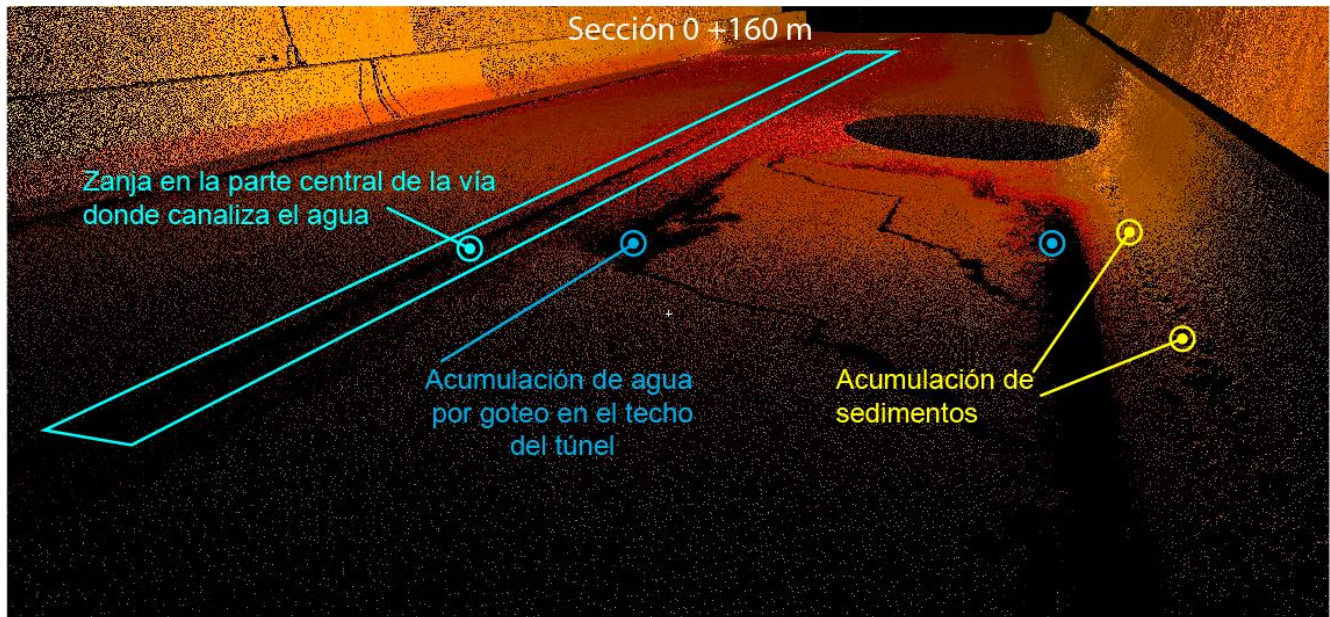


Figura 19: Modelo tridimensional de la estación 0+160. Las zonas oscuras denotan acumulación de agua superficial; en el centro de la carpeta se puede observar la zanja (el óvalo sin información denota el cono ciego creado al estar el escáner ubicado en ese sitio). A la orilla de la barrera divisoria, se observa acumulación de sedimentos en la cuneta.

- Est. 0+340: presenta un área aproximada de 30 m² con daños por humedad, donde destacan los agrietamientos y el desprendimiento de agregados. Nuevamente, las cunetas presentan acumulación de sedimentos (Figura 20).

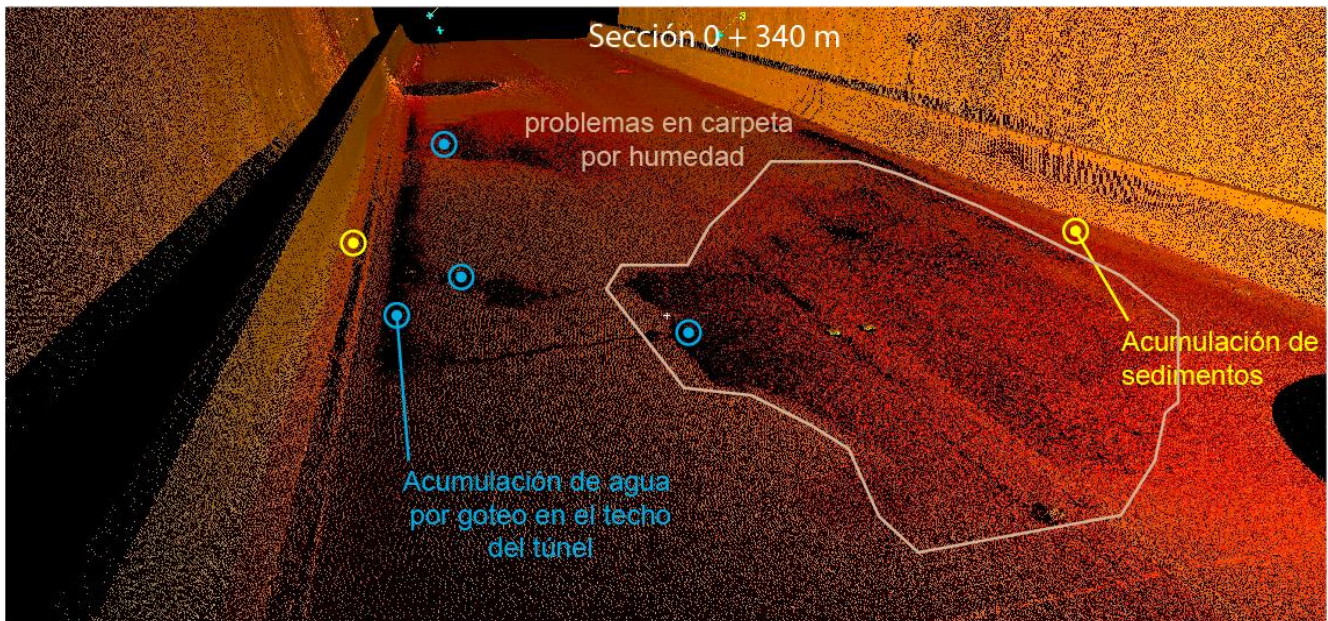


Figura 20: Modelo tridimensional de la estación 0+340. Las manchas que se observan en la carpeta marcan los sitios con problemas por humedad; de nuevo las zonas oscuras corresponden con acumulación de agua superficial (excepto la línea a la izquierda de la imagen, que es la sombra en el modelo que genera la barrera lateral).

- Est. 0+420: aproximadamente 100 m² presentan deformaciones en la carpeta producto de la acción del agua superficial, así como un mal bacheo. También presenta acumulación de sedimentos en las cunetas (Figura 21).

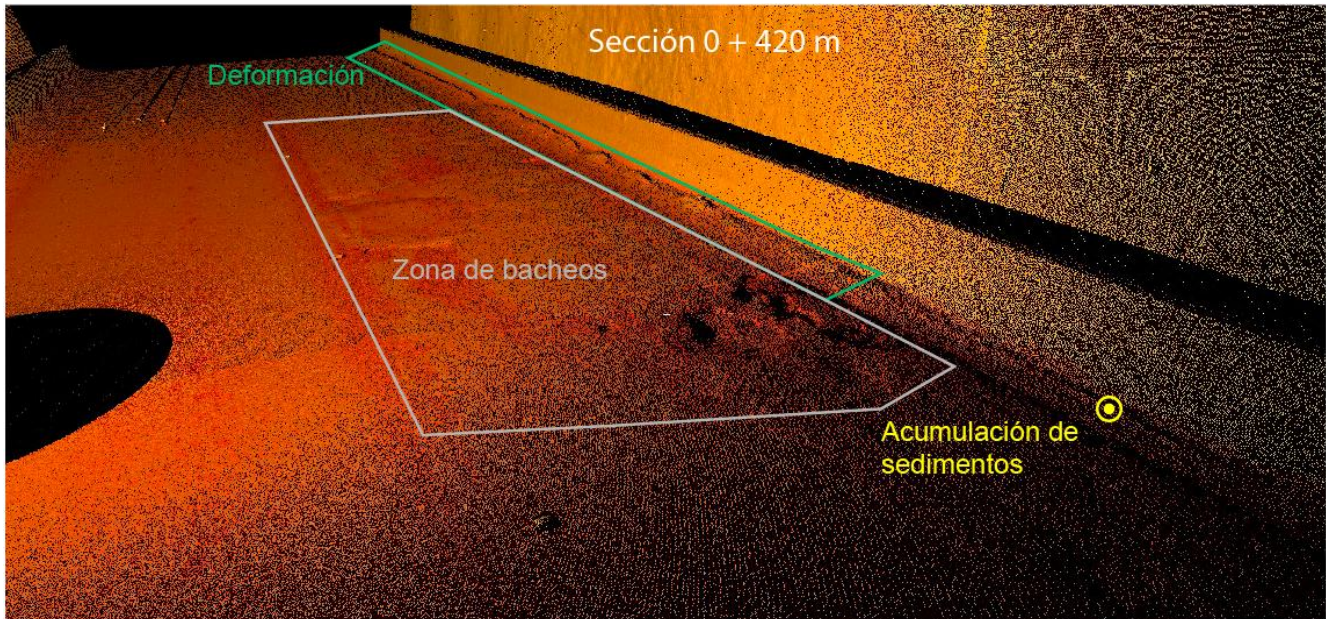


Figura 21: Modelo tridimensional de la estación 0+420. Se nota la acumulación de sedimentos en las márgenes de la carpeta, así como las deformaciones y desgaste en el pavimento.

Por lo que se ha observado en la superficie de ruedo dentro del túnel y que ha sido señalado en esta sección y las anteriores, el estado y nota de la sección completa No. 10990 no refleja el estado en que se encuentran los 592 m del túnel Zurquí.

Con respecto a las medidas de convergencias, dada la experiencia del año 2015, se decidió este año realizar una limpieza de los ganchos con cepillo de acero, para pintarlos posteriormente con pintura de color brillante, de tal manera que sean identificables de manera más fácil en el modelo tridimensional levantado con el escáner, además de que se mejora la precisión de la medida. Sin embargo, esto ocasionó que los resultados difieran un poco de los obtenidos en el 2015, sin identificarse un patrón claro.

Siguiendo la misma nomenclatura de puntos del año 2015 (Fig. 22), los resultados para ambas evaluaciones en las estaciones medidas se muestran en la Tabla 3.

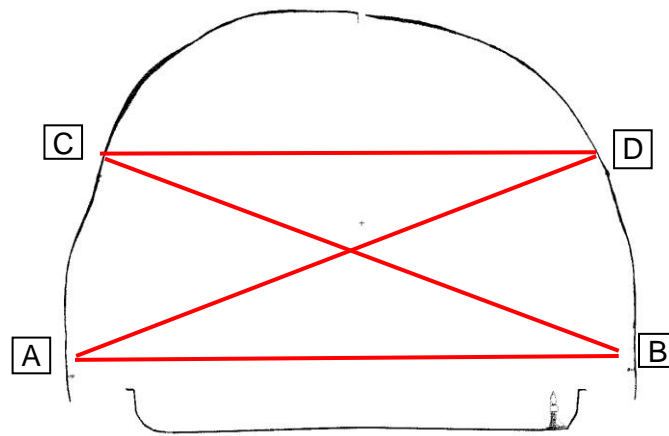


Figura 22: nomenclatura utilizada en la medición de convergencias

Tabla 3: Resultados obtenidos y comparación con los del año 2015

Estación	Año	Medidas de Convergencia (m)			
		A – B	C – D	A – D	C – B
151+05,4	2017	10,406	-	10,660	-
	2015	10,414	-	10,644	-
174+98,1	2017	10,511	-	-	10,351
	2015	10,507	-	-	10,348
351+41,6	2017	10,488	9,442	10,482	10,642
	2015	10,495	9,440	10,487	10,644
369+87,1	2017	10,859	10,216	10,983	11,133
	2015	10,861	10,225	10,987	11,135
445+88,1	2017	10,408	9,857	10,540	11,011
	2015	10,402	9,872	10,545	11,015
452+42,2	2017	10,218	-	-	-
	2015	10,222	-	-	-
462+27,2	2017	10,512	-	-	-
	2015	10,502	-	-	-

Nota: las medidas en blanco son debido a ganchos que no existen en la estación.

Como se observa, existen diferencias entre resultados de hasta 1 cm, sin embargo en una misma estación ciertas medidas pueden dar más altas, mientras que otras más bajas sin denotar un patrón. Estas diferencias se pueden deber tanto a la precisión del modelo obtenido, como a la limpieza realizada en los ganchos mismos dentro del túnel. Por lo tanto, hasta no realizar una nueva evaluación, no es posible afirmar que las paredes del túnel han presentado movimiento alguno.

7.5 Resultados de observaciones en Sistema de iluminación del túnel

Con una cámara térmica de alta resolución, información LiDAR y trabajo de campo se hizo una evaluación específica del sistema de iluminación eléctrico 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 con 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 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 (Fig. 23).

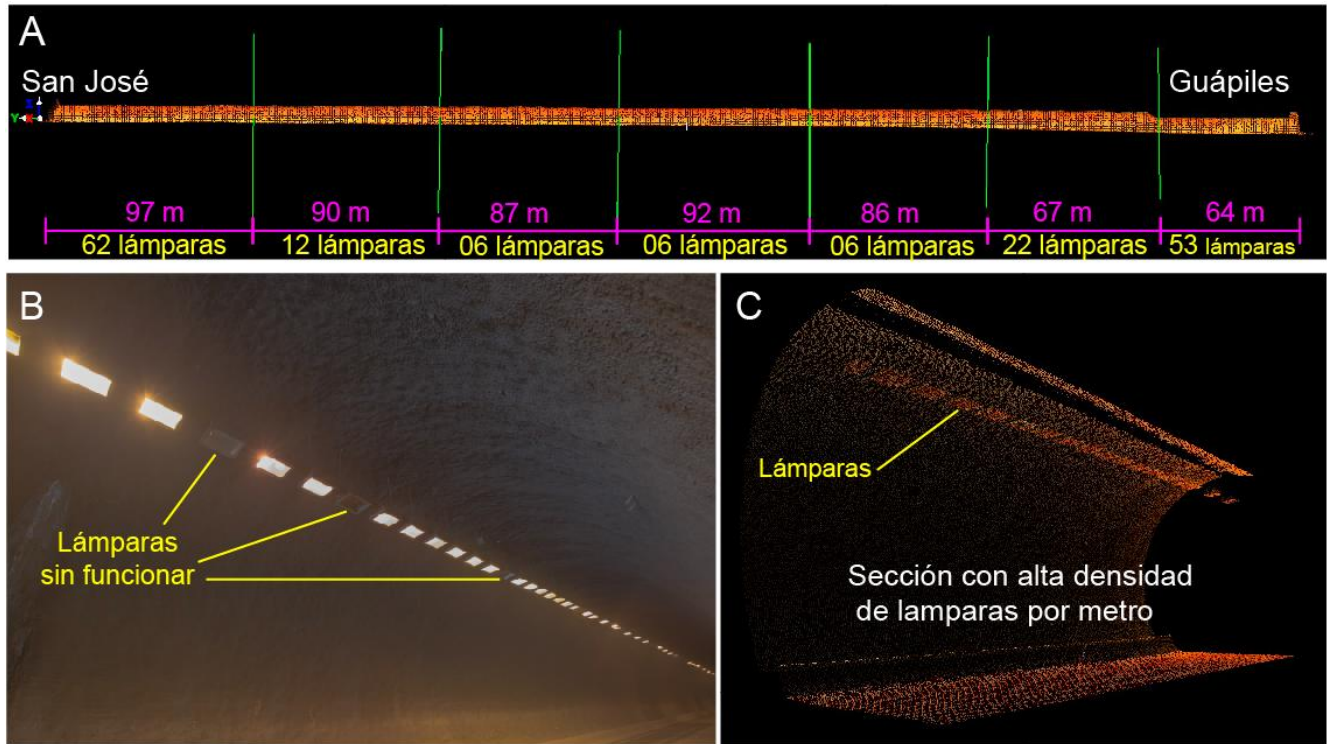


Figura 23. A) Se muestra la densidad de lámparas en el túnel Zurquí por secciones medidas. Se aprecia como hay mayor cantidad de lámparas cerca de las entradas y menor densidad en el centro donde están más espaciadas. B) Fotografía tomada donde se muestran tres lámparas que no están funcionando. C) Se muestra un corte generado con las imágenes lidar donde se aprecia una sección con alta densidad de lámparas.

En el año 2015 se determinó que un 97% de la lámparas existentes están funcionando adecuadamente, sin embargo algunas presentaban pequeñas desviaciones de la línea de centro de la corona del túnel (Ruiz et al., 2015). En esta evaluación se determinó que un 82 % de las lámparas estaban funcionando. Varias de ellas con una intensidad menor relativamente a la mayoría y un de ella con intermitencia. El 12 % restante de las lámparas no funcionan o están completamente desprendidas (Fig. 24).

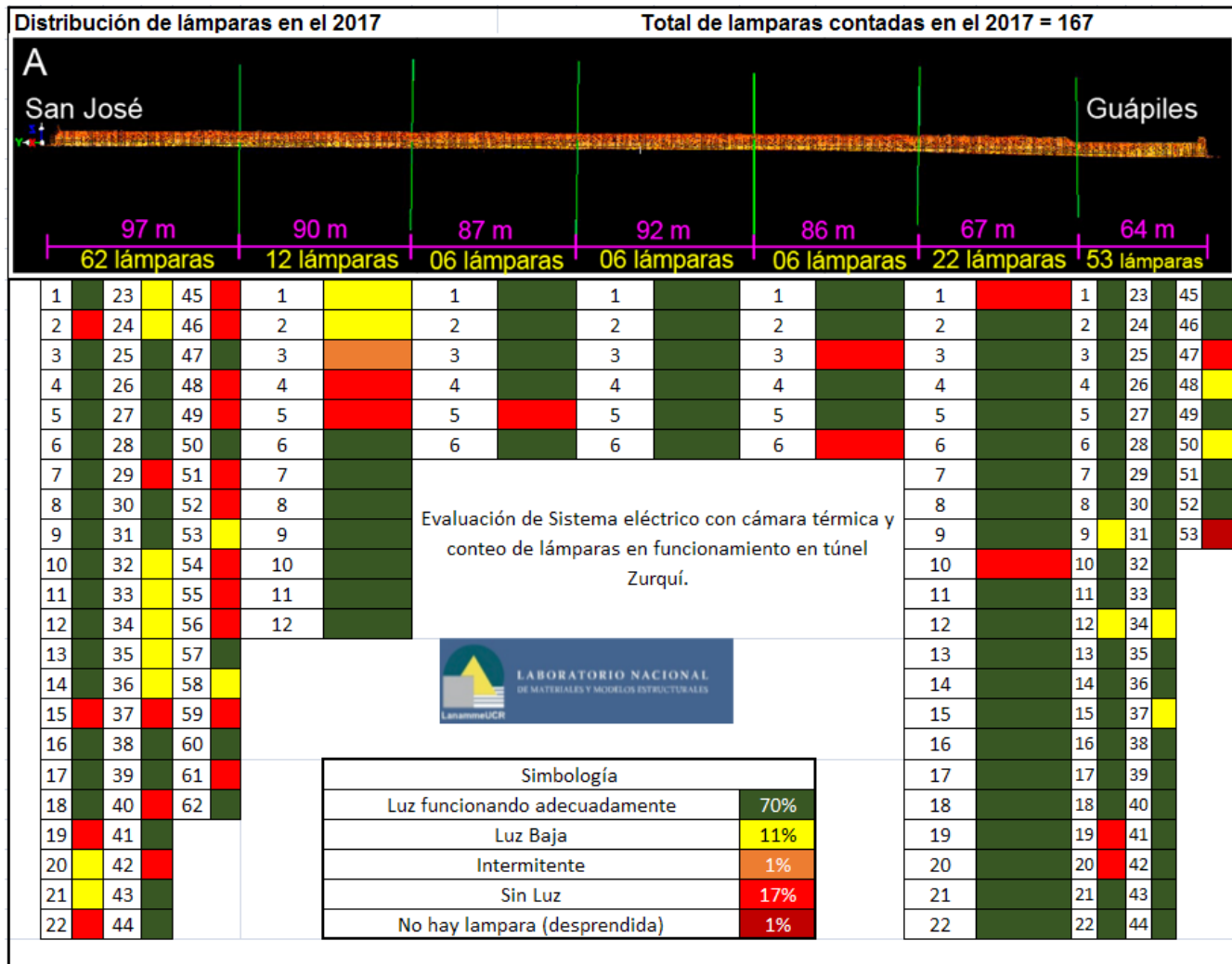


Figura 24. Esquema de funcionamiento y estado de las lámparas que iluminan el túnel Zurquí.

La iluminación en general sigue siendo buena dentro del túnel. Sin embargo en esta evaluación el sistema de iluminación se notó más deteriorado que hace dos años. Algunas lámparas no estaban funcionando del todo, otras presentaban menos intensidad. Al final del túnel en el sector de la salida hacia Guápiles, se observó cables expuestos y parte de las reglas metálicas que sostienen las lámparas sin soporte.

Con las imágenes captadas con la cámara térmica dentro del túnel se pudo detectar cinco puntos que presentaban un diferencial de temperatura en conductos de tendido eléctrico (Fig. 25-29). Estas diferencias de temperatura podrían representar un problema eléctrico que de no ser atendido podría convertirse en algo mayor y comprometer la iluminación del túnel.

Además hubo cuatro sitios que mostraron infiltración de agua que no se podían detectar a simple vista, por lo que el uso de este tipo de cámaras permitió ubicarlos (Fig. 30-33).

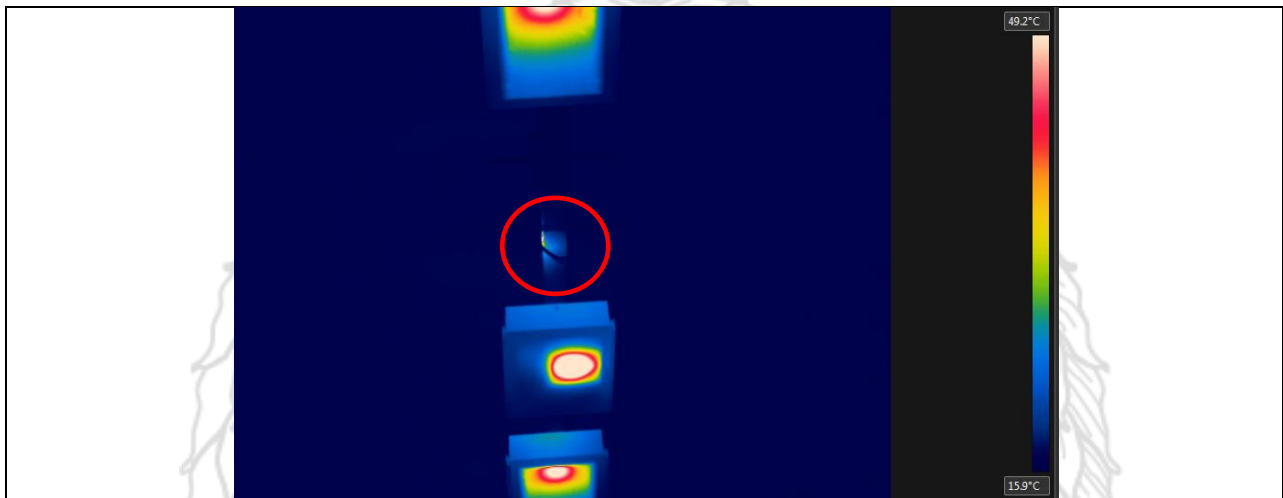


Figura 25. Est. 0+039 diferencial de temperatura en conducto de cableado eléctrico en zona donde no se encontraba la lámpara.



Figura 26. Est. 0+365 se observa un punto en el conducto del cableado eléctrico que se encuentra en una temperatura de alrededor de 35°C

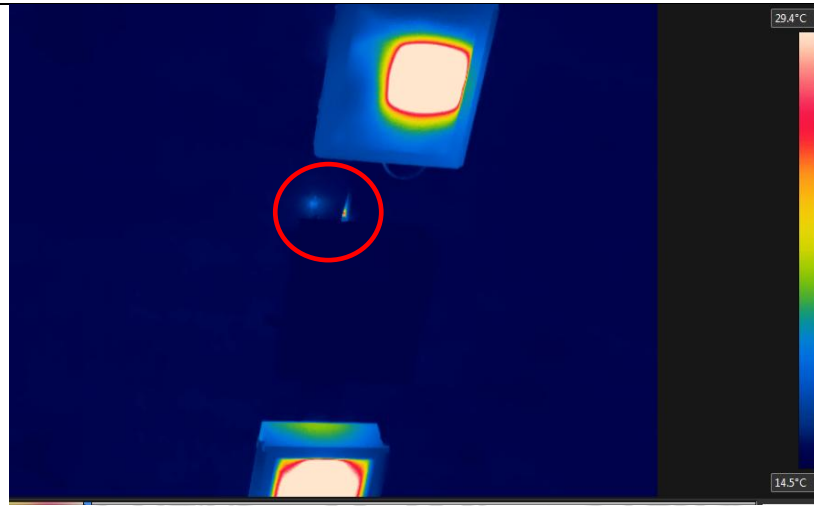


Figura 27. Est. 0+570 Se observa diferencial de temperatura en conducto de cables electricos cerca de la lampara quemada

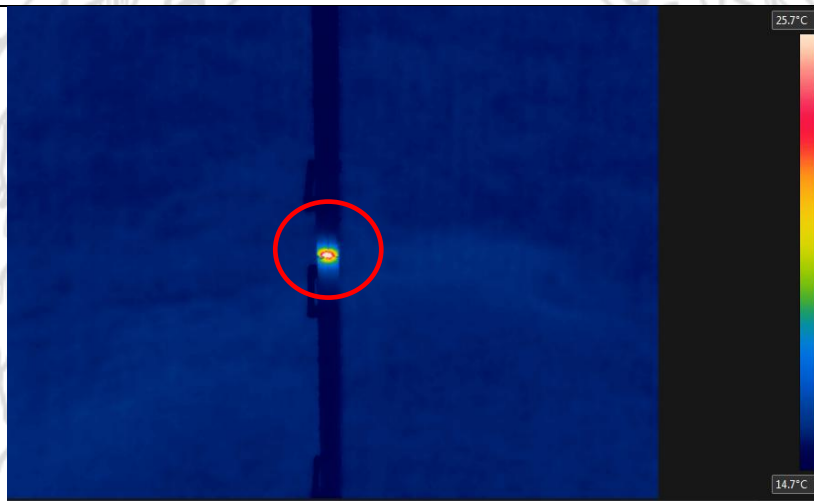


Figura 28. Est. 0+370 Se observa diferencial de temperatura en conducto de cables electricos

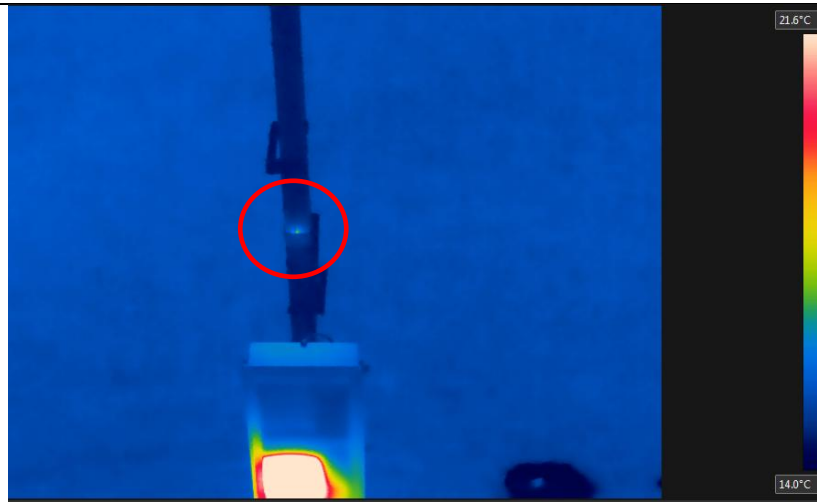


Figura 29. Est. 0+350 Se observa diferencial de temperatura en conducto de cables electricos



Figura 30. Est. 0+580 se presenta una infiltracion en la pared del LI

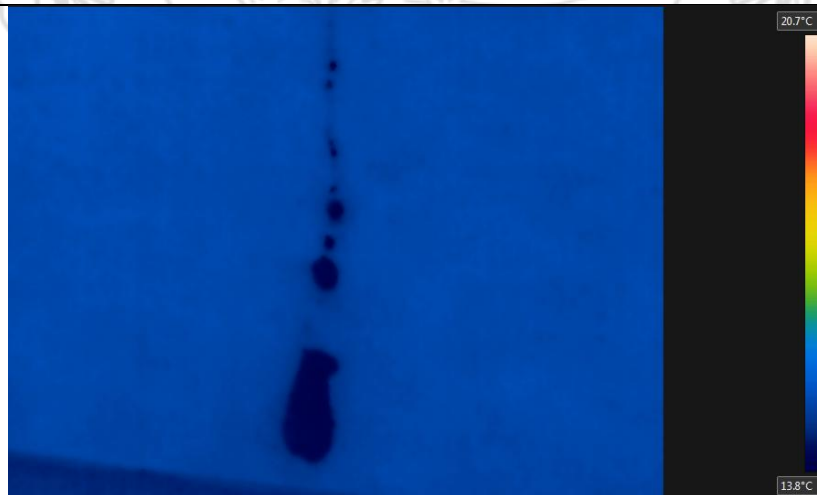


Figura 31. Est. 0+550 Se presenta una infiltración de agua

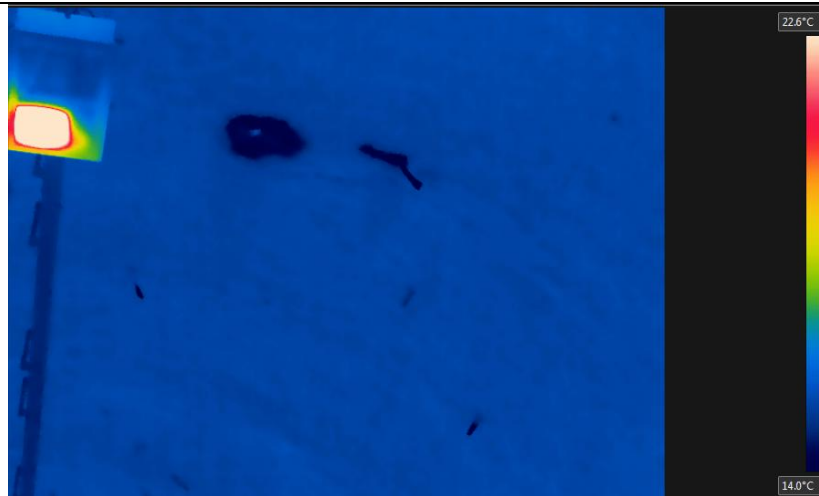


Figura 32. Est. 0+360 Se presenta una infiltración de agua

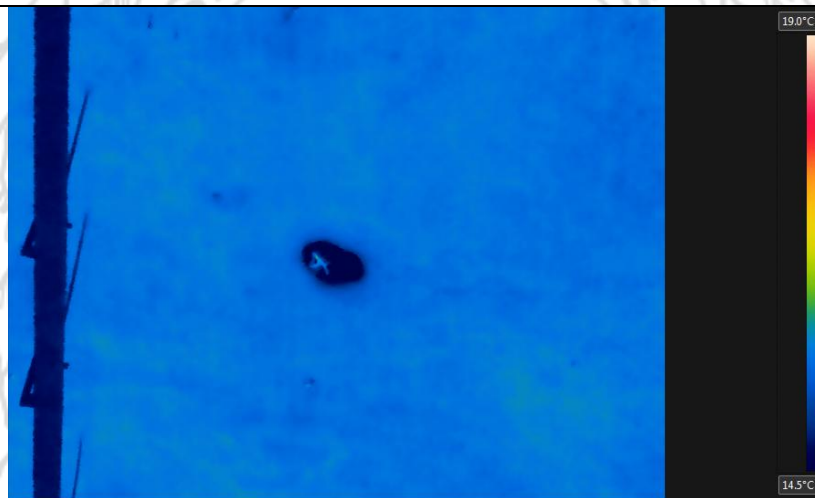


Figura 33. Est. 0+250 Se presenta una infiltración de agua en el techo del túnel

En la Tabla 4, se presenta un resumen de los resultados obtenidos para cada una de las secciones evaluadas de túnel en diferentes aspectos.

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

Sección	Hallazgos	Clasificación por importancia	Esclerómetro (MPa)
0+00 – 0+60	- Precipitaciones de sales - Acero expuesto de malla electrosoldada - Goteo	Media – Alta	> 19,6 - 68
0+60 – 0+120	- Goteo	Muy Baja – Media	> 19,6 - 44
0+120 – 0+180	- Acumulación de sales	Baja – Media	> 19,6 - 66
0+180 – 0+240	- Goteo	Muy Baja	> 19,6 - 46
0+240 – 0+300	- Goteo - Acumulación de sales	Media – Alta	> 19,6 - 40
0+300 – 0+360		Alta	
0+360 – 0+420		Muy Baja	> 19,6 - 62
0+420 – 0+480			- Humedad
0+480 – 0+540	- Humedad - Goteo - Chorro de agua - Acero expuesto de malla electrosoldada - Acumulación de sales	Media – Alta	> 15 - 66
0+540 – 0+600	- Humedad - Sedimentos entre la pared y la barrera - Acero expuesto de malla electrosoldada - Acumulación de sales	Alta	> 19,6 - 58

7.6 Comparación del estado y medidas de seguridad del túnel Zurquí con estructuras de longitud similar en la región latinoamericana

Se presenta la información de túneles similares al Zurquí en la región para comparar sus características y ver que mejoras se le podrían hacer.

Según los datos recopilados, el túnel carretero más extenso en Centroamérica es el Zurquí con 594 m. El túnel que se le acerca más en extensión es el ubicado en la Carretera CA: tramo La Libertad-Acajutla en El Salvador con un largo de 577 m. El Salvador cuenta con cinco estructuras subterráneas para el paso de vehículos que suman 1464 m siendo el país con más metros lineales de túneles en el área centroamericana. A continuación se presenta un resumen de la recopilación realizada de los túneles carreteros existentes en Centroamérica (Tabla 4). Sin considerar los del metro, ferrocarril y de usos hidroeléctricos.

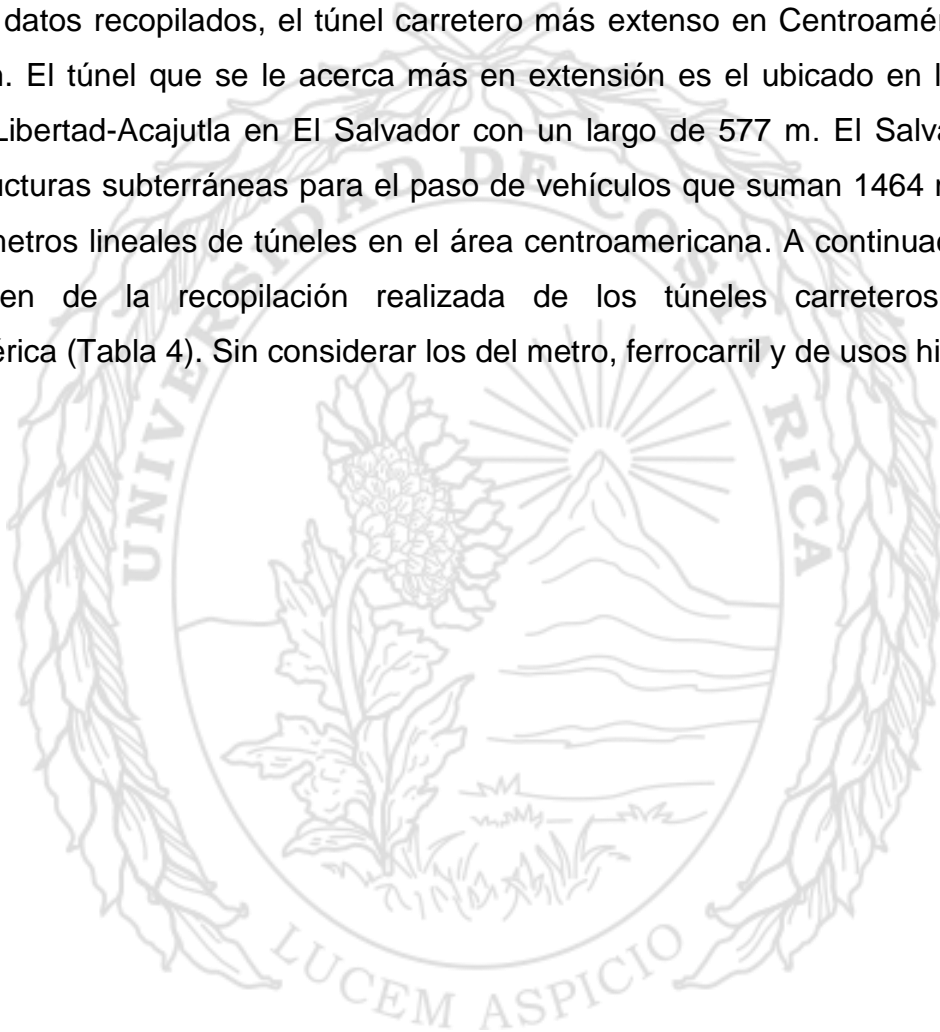






Tabla 4. Túneles carreteros en Centroamérica

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
	“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

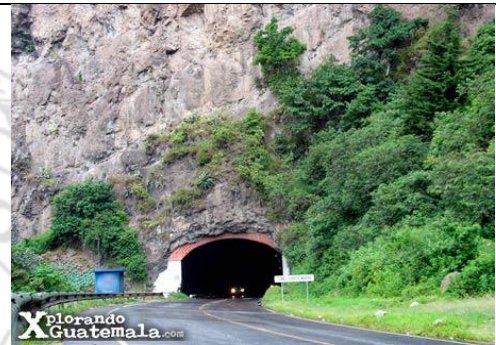
Al extender el análisis y comparación de túneles con otros países de la región como, México, Perú, Venezuela y Colombia, existen estructuras que superan por mucho a las obras centroamericanas tanto en la longitud de los túneles como en el total de los metros lineales de obras subterráneas para paso de vehículos. Otro aspecto interesante es que existen túneles con largos similares o menores al Zurquí que presentan medidas de seguridad mucho mejores (Tabla 5). Entre las características más importantes que presentan estos túneles están: captaluces electrónicos, pizarras electrónicas de información en la entradas, sistemas de ventilación, sistemas contra incendios, sistemas de monitoreo y en algunos casos cuando están cerca de centros urbanos casetillas con policías de tránsito en las entradas . Este laboratorio considera que algunas de estas medidas se deberían considerar para ser adoptadas en el túnel Zurquí para así estar a un mismo nivel de servicio y seguridad vial con túneles de longitud similar en la región.

Las imágenes que se presentan en la Tabla 5 son con fines ilustrativos de este trabajo académico y de evaluación. Corresponden a capturas de videos subidos por diferentes usuarios al sistema youtube. En cada caso se colocó el vinculo electrónico que lleva al video donde se puede consultar el usuario y dueño de las imágenes.

Tabla 5. Resumen de características de algunos túneles de la región

Túnel	País	Carriles	Autopista/Tramo	
Zurquí	Costa Rica	2	RN-32, San Jose-Limón	
Longitud	Ancho	Alto		
592	11	8		
Observaciones				
No presenta hidrantes, extintores, sistema de comunicación con tránsito. La parte superior de la entrada y salida están cubiertas por vegetación. Originalmente no era así.				
Túnel	País	Carriles	Autopista/Tramo	
Huauchinango	México	2 c/u	Nuevo Necaxa-Avila de Camacho	
Longitud	Ancho	Alto		
110/93	10	8.35		
Observaciones				
Iluminación lateral, en la entrada hay una casetilla con un policía de tránsito. No se observan sedimentos a los lados https://www.youtube.com/watch?v=gSSnvGycQyE				
Túnel	País	Carriles	Autopista/Tramo	
Xaltepec	México	4	Perote-Banderilla	
Longitud	Ancho	Alto		
342	18	9		
Observaciones				
Iluminación lateral, no hay sedimentos en los bordes hay captaluces electrónicas a los lados. No se observan hidrantes https://www.youtube.com/watch?v=gi9GKCJvO4I				
Túnel	País	Carriles	Autopista/Tramo	
Luis Donaldo Colosio	México	2 c/u	Libramiento de Puerto Vallarta	
Longitud	Ancho	Alto		
450	-	-		
Observaciones				
Iluminación lateral a ambos lados. Presenta sistemas de ventilación en la parte superior https://www.youtube.com/watch?v=iPVjgkXaq8s				

Túnel	País	Carriles	Autopista/Tramo
Varios	México	2	Durando-Mazatlan
Longitud	Ancho	Alto	
<200 m	2 carriles	-	
Observaciones			
Iluminación lateral, entradas y salidas libres de vegetación https://www.youtube.com/watch?v=iPVjgkXaq8s			
Túnel	País	Carriles	Autopista/Tramo
Santa Maria de Jesús	Guatemala	2	Quetzaltenango-Retalhuleu
Longitud	Ancho	Alto	
227	-	-	
Observaciones			
No presenta iluminación, las paredes no tienen recubrimiento. Entradas y salidas en cortes verticales https://www.youtube.com/watch?v=AICsLNeZrpc			
Túnel	País	Carriles	Autopista/Tramo
Varios	El Salvador	2	El Litoral
Longitud	Ancho	Alto	
86-577	-	-	
Observaciones			
5 túneles a lo largo de la carretera El Litoral, entre 89 y 577m https://www.youtube.com/watch?v=WBDC-z46Qm0			
Túnel	País	Carriles	Autopista/Tramo
Dos quebradas	Colombia	2	Autopista del Café
Longitud	Ancho	Alto	
134	10	5,5	
Observaciones			
Sin iluminación, tiene captaluces laterales, es un túnel en curva y una de sus salidas es hacia un puente helicoidal https://www.youtube.com/watch?v=1wUoSjGZ-s			



Túnel	País	Carriles	Autopista/Tramo
Túnel de Gualanday	Colombia	2	4G
Longitud	Ancho	Alto	
Observaciones			
Presenta pizarras informativas en las entradas. Hay muy buena señalización https://www.youtube.com/watch?v=_ifDMV9h0hM			
Túnel	País	Carriles	Autopista/Tramo
Varios	Colombia	2	Villavicencio-Bogotá
Longitud	Ancho	Alto	
Observaciones			
En algunos existen agujas para detener impedir la entrada en caso de emergencia o accidente, iluminación lateral, salida a puente. https://www.youtube.com/watch?v=8VYforilToo			
Túnel	País	Carriles	Autopista/Tramo
Túnel de la Cabrera	Venezuela	2 c/u	Autopista Regional del Centro
Longitud	Ancho	Alto	
520			
Observaciones			
Iluminación lateral superior, sin embargo el túnel es muy oscuro en comparación con otros de largo similar. Está en una zona urbana https://www.youtube.com/watch?v=x-s76j4g-Xo			
Túnel	País	Carriles	Autopista/Tramo
Túnel Cañabrava	Venezuela	2	Dr. Rafael Caldera
Longitud	Ancho	Alto	
538			
Observaciones			
Iluminación lateral https://www.youtube.com/watch?v=GwYat4gVNNw&t=124s			



Túnel	País	Carriles	Autopista/Tramo
Santa Rosa y San Martín	Perú	2 c/u	Rimac - San Juan de Lurigancho
Longitud	Ancho	Alto	
250	12	8	
Observaciones			
https://www.youtube.com/watch?v=f1uuOZZthM			



Actualmente el túnel Zurquí no cuenta con un sistema contra incendios, en la RN-32 han ocurrido accidentes entre vehículos que se han incendiado. El caso más reciente se dio el lunes 17 de abril del presente año. En el km 27, dos camiones de carga impactaron de frente en una curva. Debido a esta colisión el camión que viajaba hacia Limón fue envuelto en llamas, quemándose completamente, tres personas resultaron heridas (La Nación, 2017, Fig 34).



Figura 34. Se muestra el resultado de un accidente de tránsito en la Ruta Nacional No. 32 en abril de este año. Un incendio de este tipo sería muy difícil de controlar dentro del túnel. Equipamiento contra incendios y sistemas de comunicación cerca de la estructura facilitarían atender este tipo de emergencias dentro del túnel.

Si este accidente se hubiera dado dentro del túnel, la situación hubiera sido mucho más grave. Las altas temperaturas que se generarían en un ambiente casi confinado como el

túnel, limitarían la intervención de los cuerpos de socorro. Además existe la posibilidad que el fuego pueda debilitar las estructuras de la malla electrosoldada o acero.

9. CONCLUSIONES

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. En esta oportunidad se trabajó con un equipo de 14 personas entre ingenieros civiles, geólogos y asistentes. Se utilizó un escáner LiDAR terrestre, esclerómetro y cámaras térmicas.

Según los resultados de las observaciones y mediciones realizadas, se considera que el túnel en general se encuentra en buen estado, sin embargo en esta oportunidad el pavimento dentro del túnel se encuentra más deteriorado que hace dos años. Además que no se han intervenido los sitios con problemas que fueron identificados desde el año 2014.

Por lo que se ha observado en la superficie de ruedo dentro del túnel y que ha sido señalado en este informe, el buen estado y nota Q de la sección completa No. 10990 no refleja el estado en que se encuentran los 592 m del túnel Zurquí. Consideramos que la presencia continua de agua sobre ciertos sectores del pavimento lo ha ido desgastando prematuramente. Esta humedad podría ser un problema al colocar material nuevo sobre la vía, por lo que debería de eliminarse la fuente de humedad.

De los resultados obtenidos con el esclerómetro se determina que existen muy pocos sitios con 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.

La iluminación en general sigue siendo buena dentro del túnel. 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 generar un problema de seguridad para los usuarios.

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.

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.

10. RECOMENDACIONES

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 este laboratorio hace las siguientes recomendaciones a partir de esta evaluación:

- 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. Considerar la instalación de captaluces electrónicos y darles adecuado mantenimiento.
- Reparar los sitios que fueron encontrados con goteo intenso, especialmente si se presenta en la parte del techo del túnel. Este goteo está generando, acumulación de agua en la parte central de la vía y repercutiendo negativamente en el pavimento ya que lo

desgasta de forma prematura. La colocación de un nuevo pavimento o colocación de bacheo se tiene que realizar en condiciones donde no exista acumulación de agua sobre la vía.

- 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 del 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, lámparas sin funcionar.
- 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.
- Reparar las lámparas que no están funcionando y evaluar completamente el sistema eléctrico.
- 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.
-

Para el túnel del Zurquí en general, se recomienda continuar realizando inspecciones periódicas cada dos a tres años. Incluir una revisión fuera de esta programación cada vez que ocurra un sismo que genere intensidades y aceleraciones como las que fueron mencionadas en este informe. Las siguientes evaluaciones deben emplear al menos las mismas técnicas que en las evaluaciones realizadas en el 2014 y 2017 por este laboratorio, 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. Finalmente se recomienda continuar realizando las convergencias y martillo Schmidt, para poder realizar comparaciones a lo largo del tiempo.

11. AGRADECIMIENTOS

A la Red Sismológica Nacional por los datos suministrados del sismo del 2015 en las cercanías del túnel. A los ingenieros Pablo Agüero, Luis Guillermo Vargas y Fernando Porras de las unidades de puentes y municipal de LanammeUCR por su colaboración en dirigir los equipos de trabajo durante la evaluación del túnel. También se agradece el trabajo y disposición de los estudiantes de la Universidad de Costa Rica: Carolina Suárez, Amalia Gutiérrez, Randall Carballo, José María Sequeira, María José Sáenz, María Fernanda Carrillo, Alexander Sandoval y Diego Herrera

12. 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.
- Coquand, Roger, Caminos, Reverté, Zaragoza, España, Versión española por Enrique Rodón, 1965.
- 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.
- 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($M_s=5,9$) 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.
- Red Sismológica Nacional RSN., 1991: La crisis sísmica del golfo de Nicoya y eventos sísmicos relacionados, Costa Rica, 1990
- Red Sismológica Nacional RSN.,2004: Terremoto de Damas(Quepos) del 20 de Noviembre del 2004
- Red Sismológica Nacional RSN.,2009: El terremoto de Cinchona del 8 de enero de 2009.- 138 págs.
- Red Sismológica Nacional RSN.,2012: El terremoto de Sámara del 5 d setiembre del 2012.- 136 págs
- 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
- Ruiz, P., Castanedo, C., Garro, J., & Barrantes, R., (2015). Metodología de seguimiento postconstructivo de túneles en ambientes tropicales, caso práctico: Túnel Zurquí, Ruta Nacional No. 32, Costa Rica
- 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

12. ANEXOS

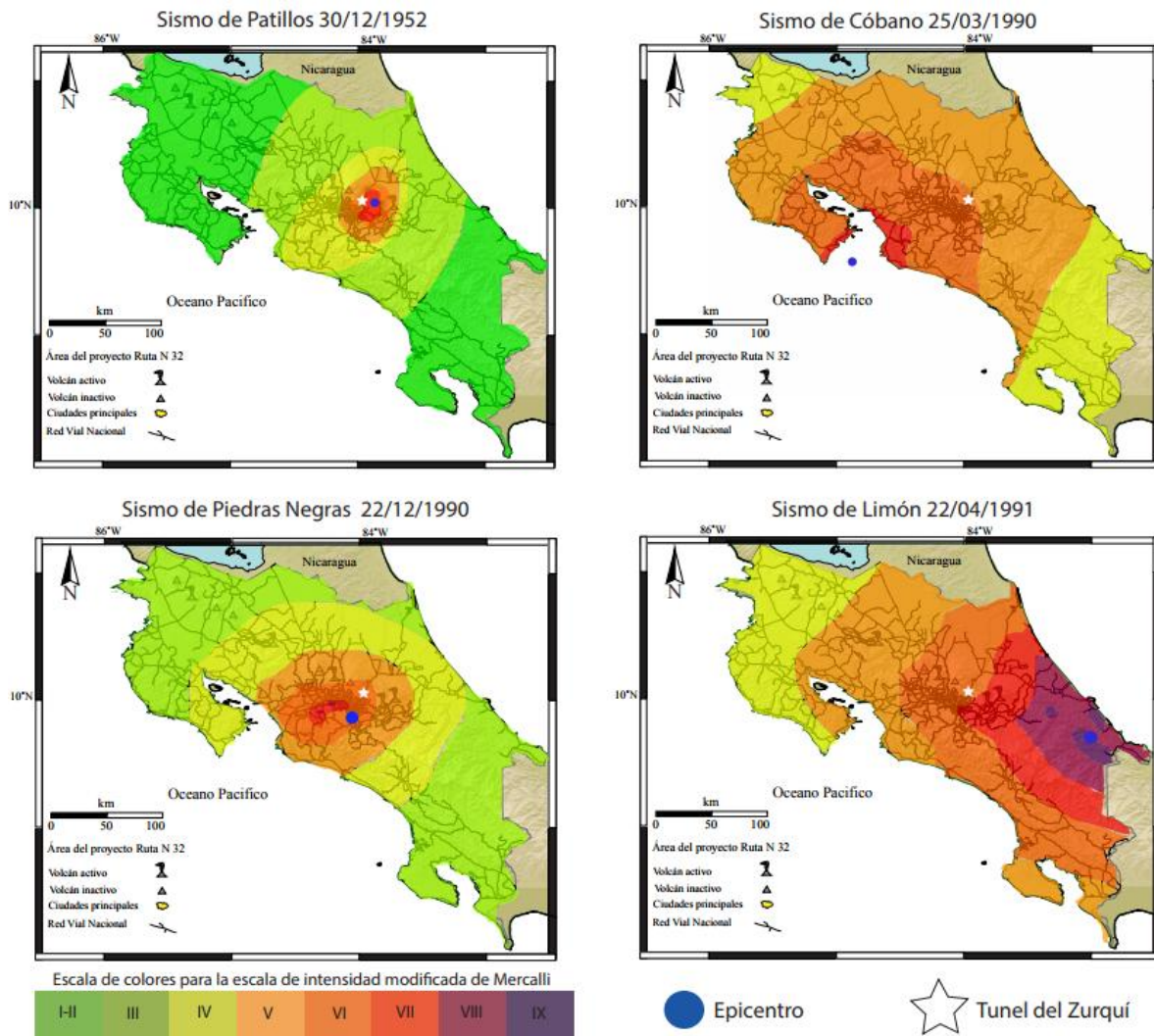


Fig. 12.1 Mapas con la ubicación e intensidades de cada uno de estos sismos y su relación con la ubicación del túnel Zurquí

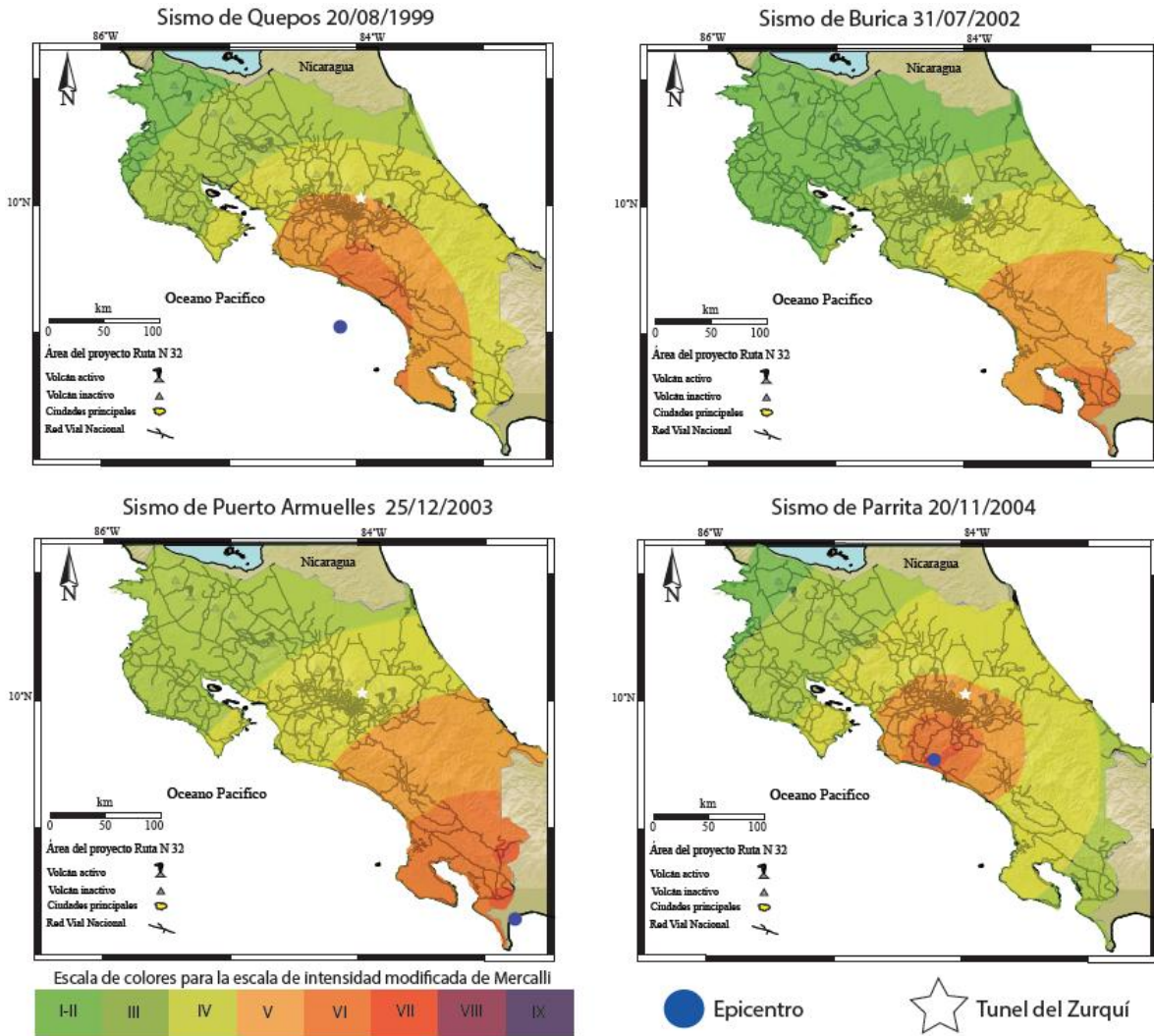


Fig. 12.2 Mapas con la ubicación e intensidades de cada uno de estos sismos y su relación con la ubicación del túnel Zurquí

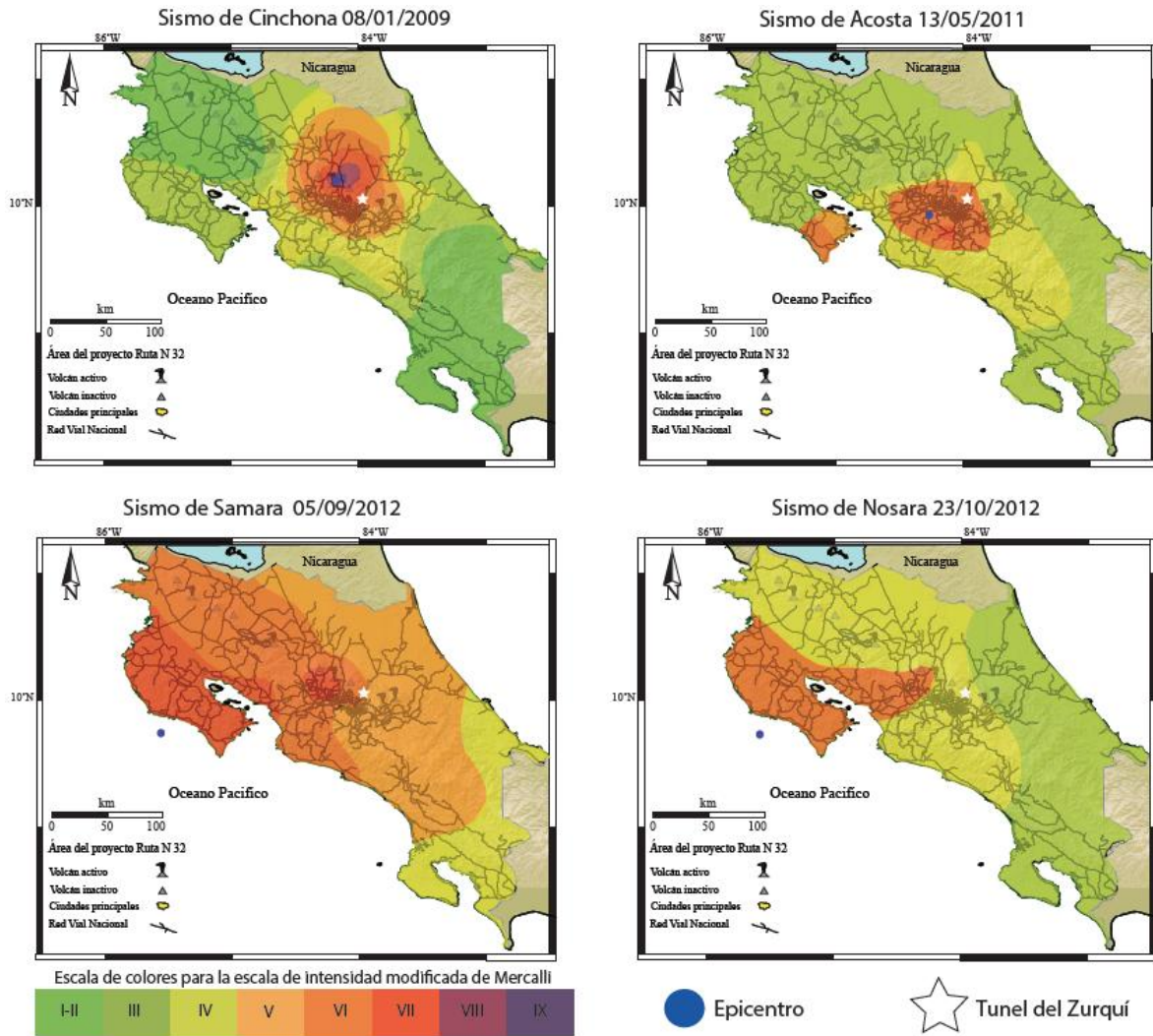
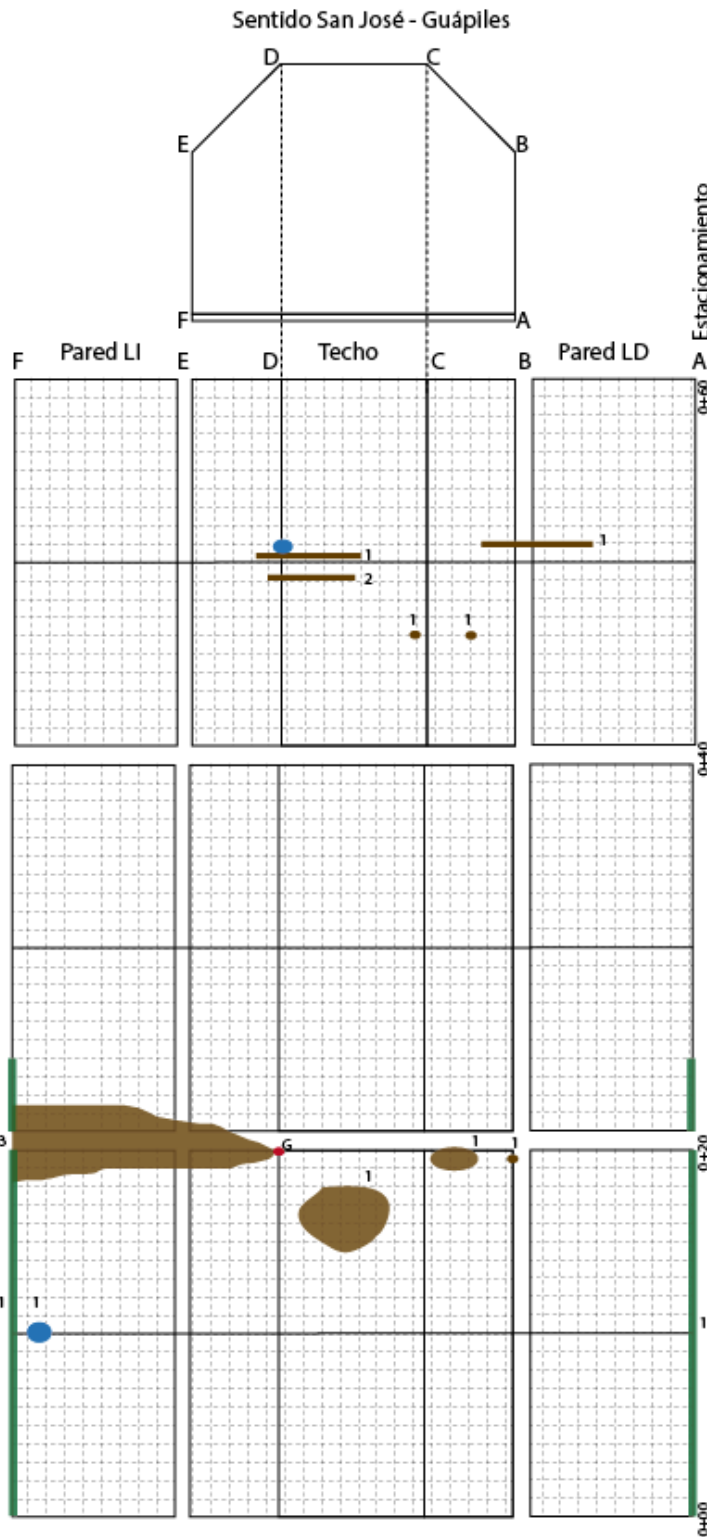


Fig. 12.3 Mapas con la ubicación e intensidades de cada uno de estos sismos y su relación con la ubicación del túnel Zurquí




**LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES**
LanammeUCR

**Evaluación de Túnel Zurquí 2017
LanammeUCR UGERVN**

Simbología

Precipitaciones calcáreas	Grietas	Humedad en borde
Acero expuesto	Goteo Leve	Humedad
Goteo	Goteo Intenso	Eflorescencia

Fotos

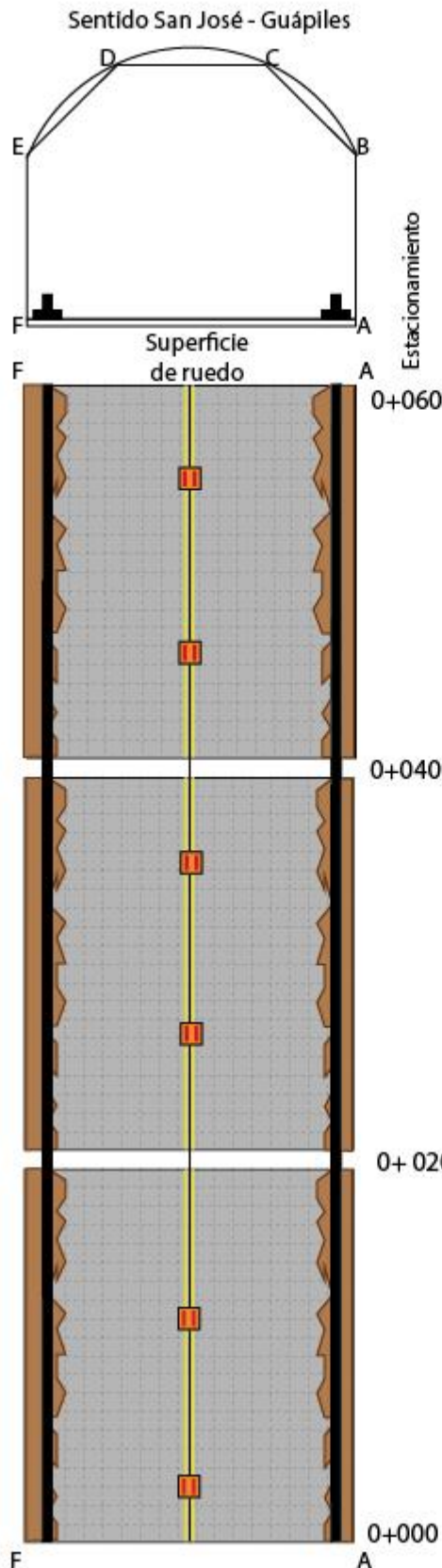
1: poca importancia
2: media importancia
3: alta importancia
4: muy alta importancia

Notas




Eflorescencias o precipitaciones de sales
Estacionamiento 0 +020



Acero expuesto L.I a
10 m del inicio.



Simbología

-  Falta de Captaluces
-  Acumulación de agua en vía
-  Acumulación de sedimentos

A Estado

Fotos

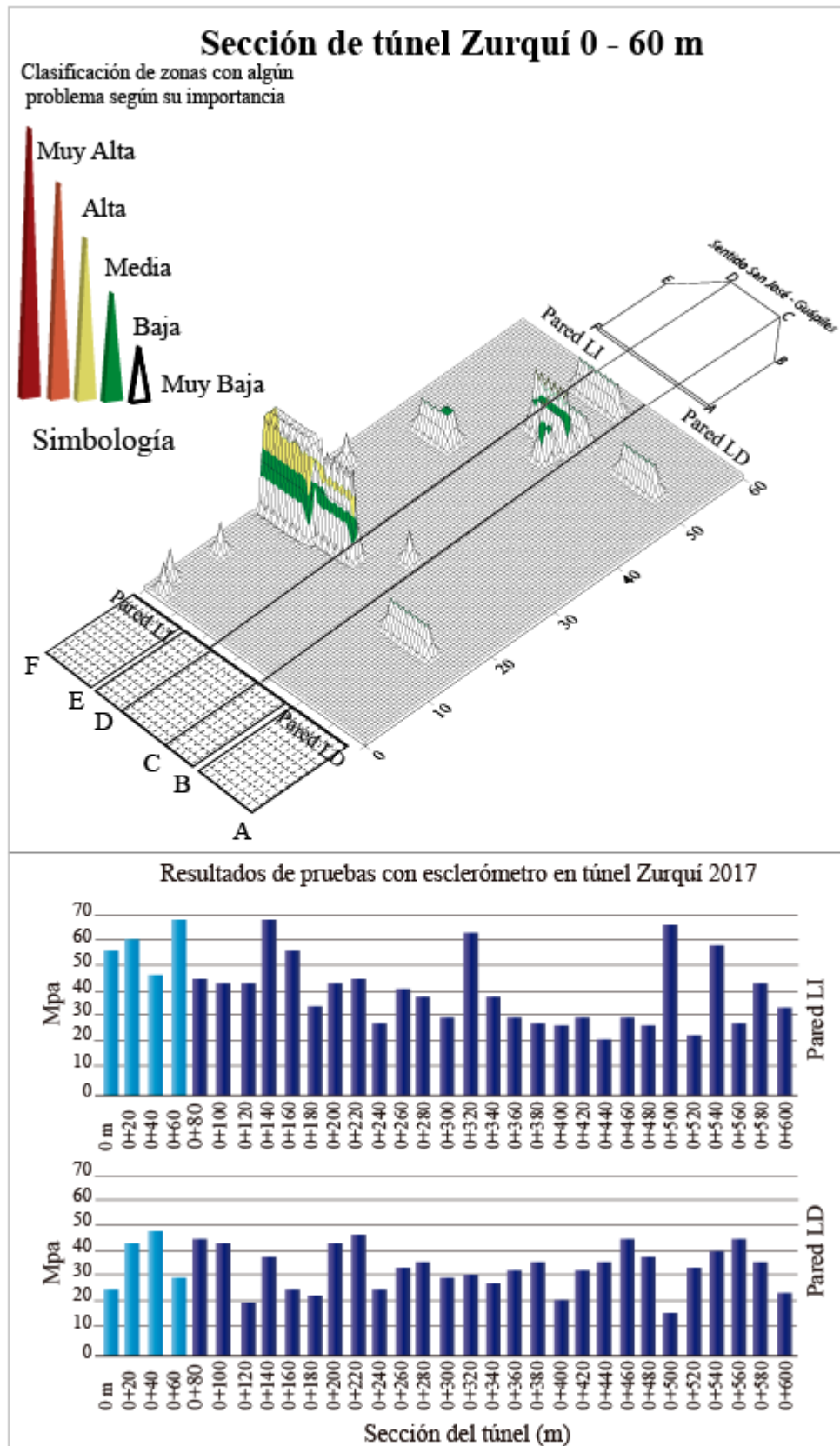
Notas:



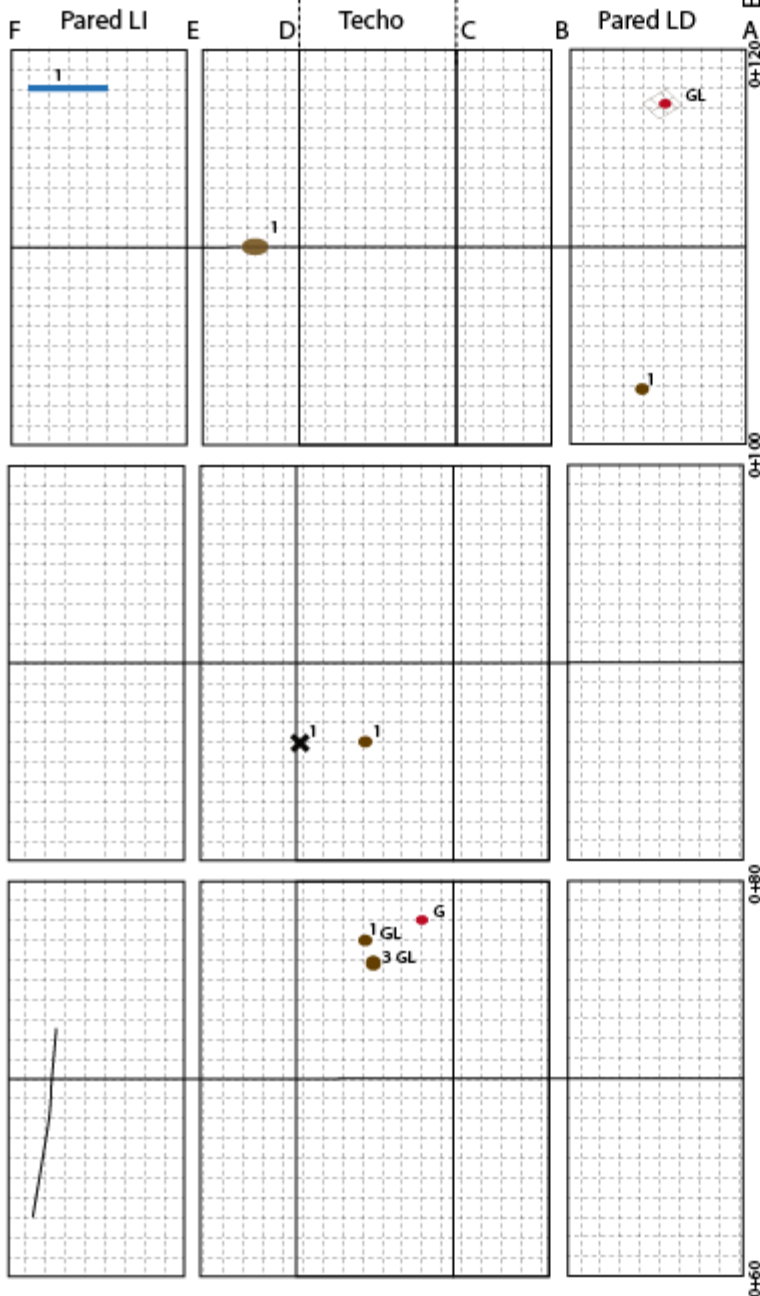
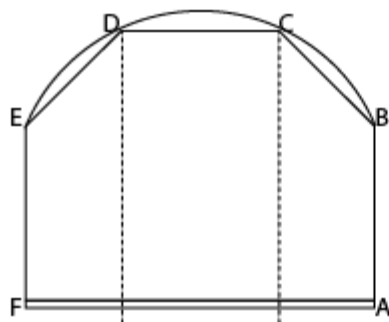
Acumulación de sedimentos



Falta de Captaluces



Sentido San José - Guápiles



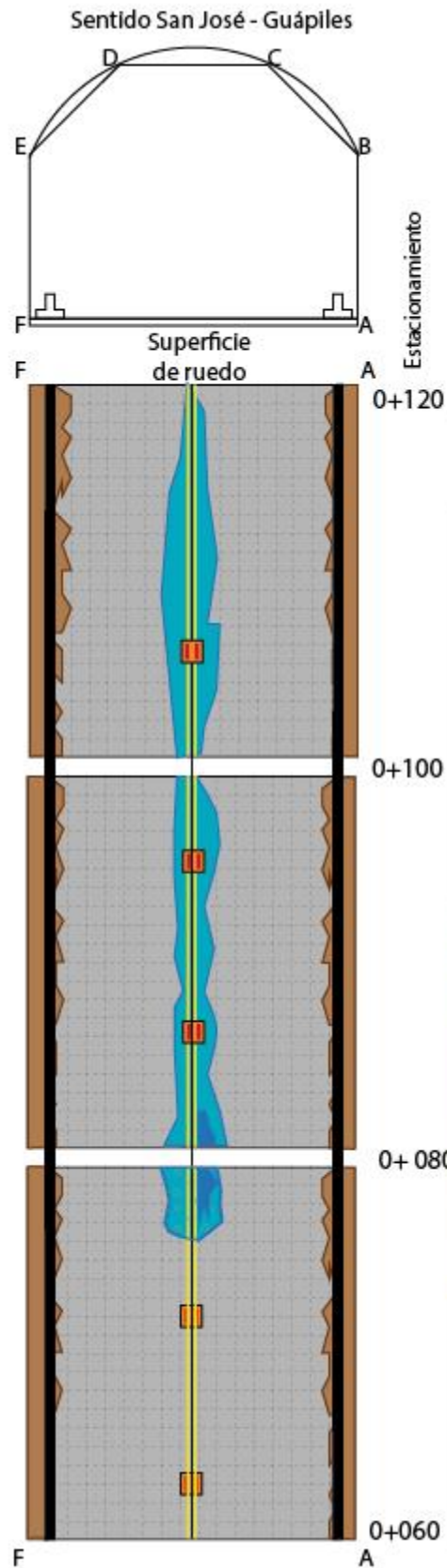

LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Evaluación de Túnel Zurquí 2017
LanammeUCR UGERVN





Simbología

- | | | |
|---------------------------|---------------|------------------|
| Precipitaciones calcáreas | Grietas | Humedad en borde |
| Acero expuesto | Goteo Leve | Humedad |
| Goteo | Goteo Intenso | Eflorescencia |

Fotos	1: poca importancia 2: media importancia 3: alta importancia 4: muy alta importancia
	Notas



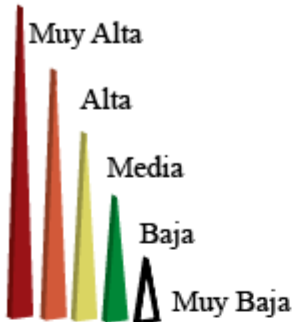
Simbología

-  Falta de Captaluces
-  Acumulación de agua en vía por goteo
-  Superficie siempre húmeda por goteo
-  Acumulación de sedimentos

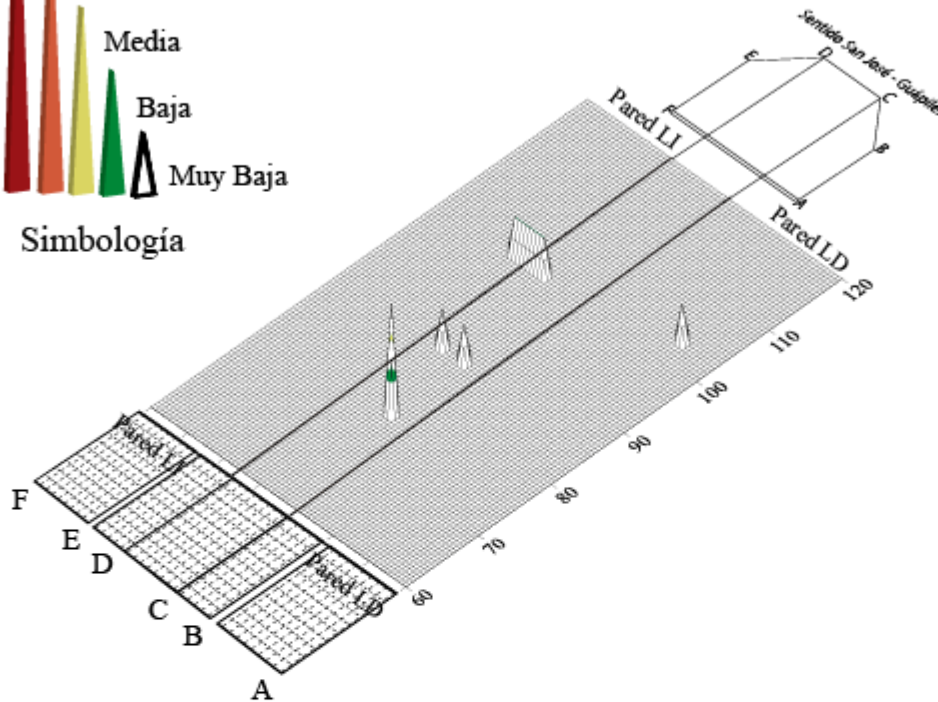
Fotos	Estado
Notas:	
	

Sección de túnel Zurquí 60 - 120 m

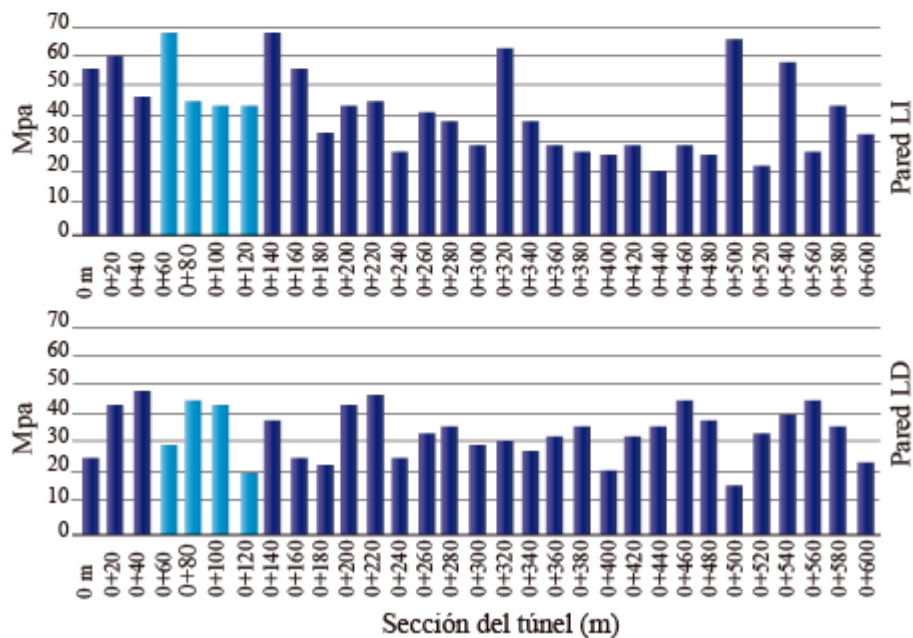
Clasificación de zonas con algún problema según su importancia



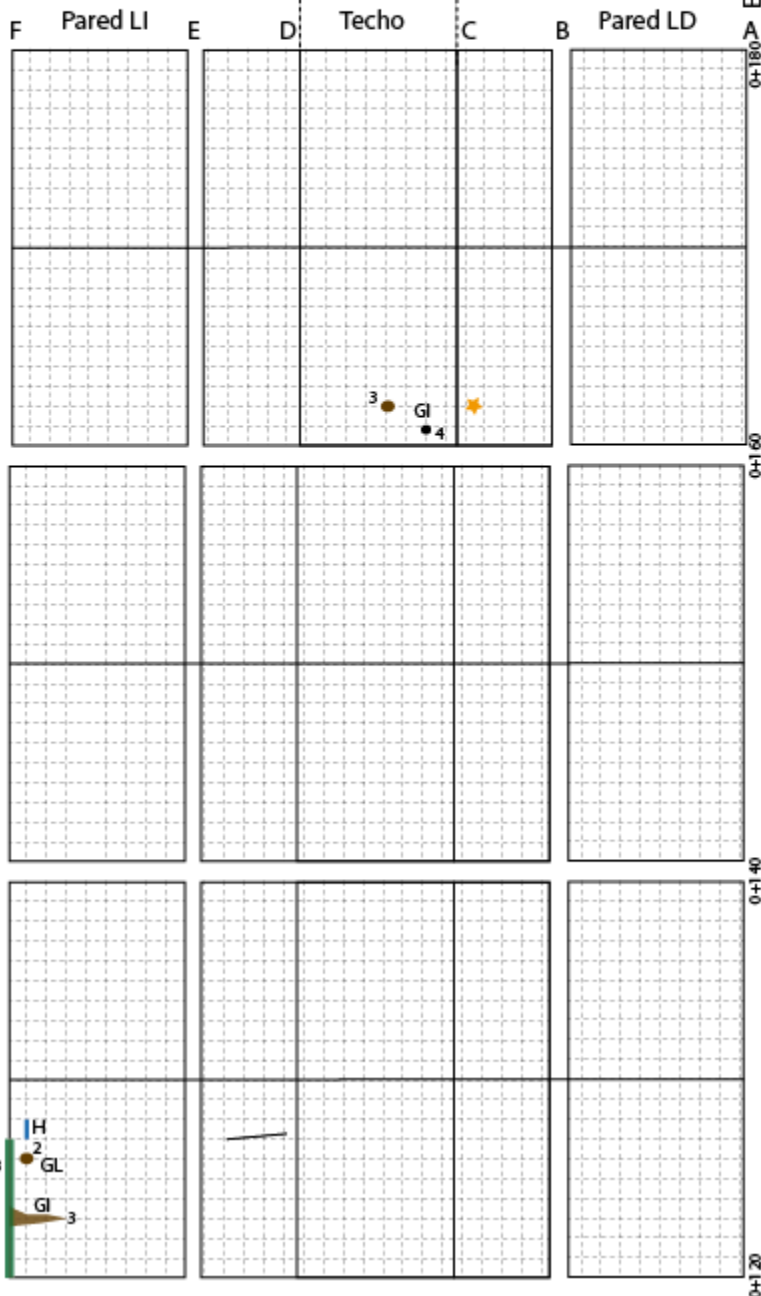
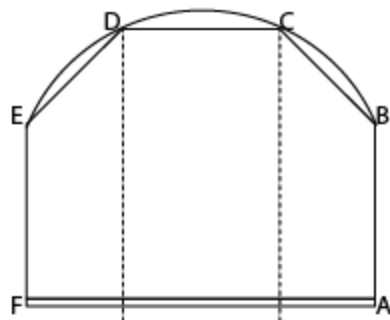
Simbología



Resultados de pruebas con esclerómetro en túnel Zurquí 2017







Sentido San José - Guápiles



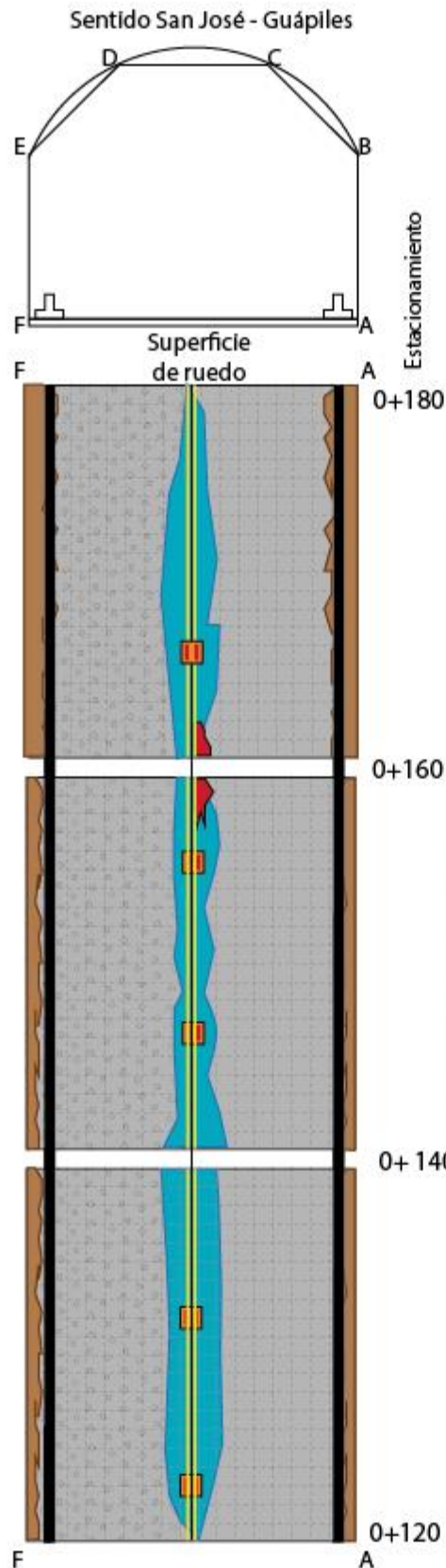


LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Evaluación de Túnel Zurquí 2017
LanammeUCR UGERVN

- Simbología**
-  Tubo con agua escurriendo
 -  Precipitaciones calcáreas
 -  Acero expuesto
 -  Goteo
 -  Grietas
 -  Humedad en borde
 -  Humedad
 -  Goteo Leve
 -  Goteo Intenso
 -  Eflorescencia






Fotos	<p>1: poca importancia 2: media importancia 3: alta importancia 4: muy alta importancia</p>
F# 8470	
F# 8460	



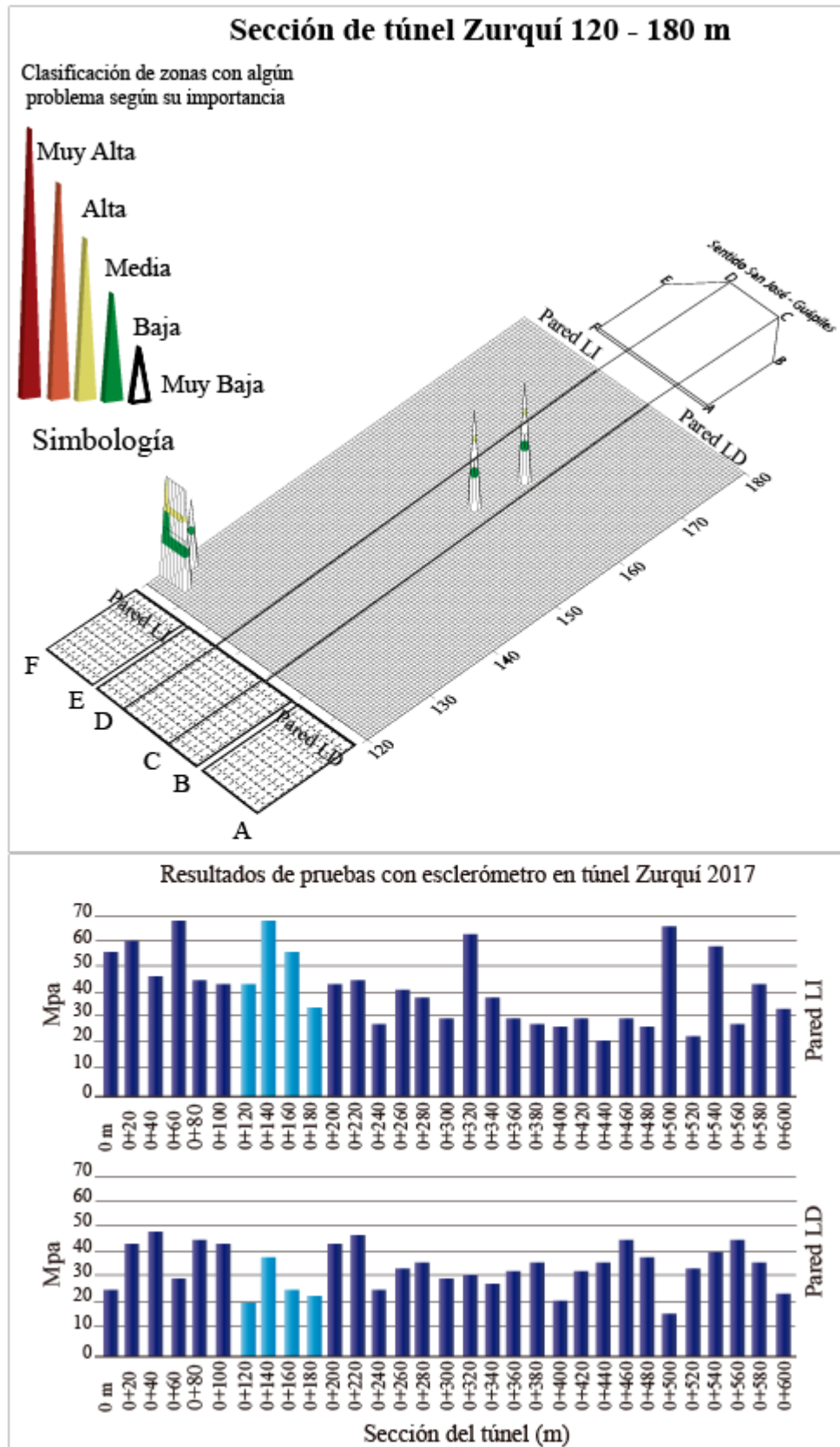

LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Evaluación de Túnel Zurquí 2017
LanammeUCR UGERVN

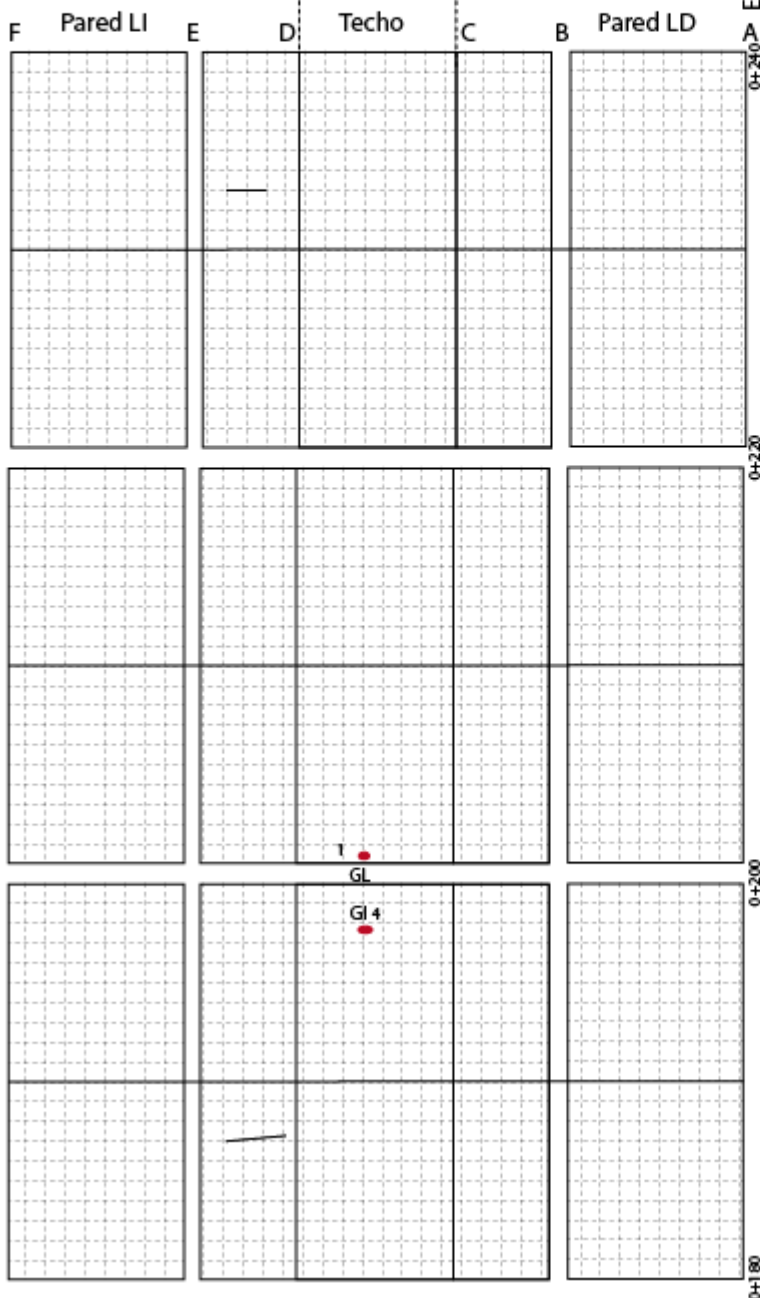
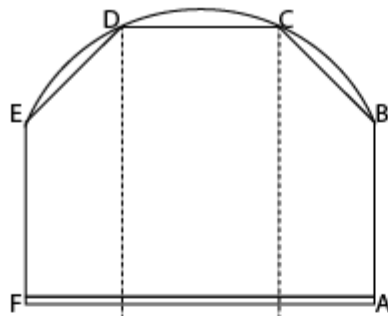
Simbología

-  Falta de Captaluces
-  Superficie siempre húmeda por goteo
-  Acumulación de sedimentos
-  Desprendimiento
-  Desprendimiento de asfalto (hueco)

Fotos	Estado
Notas:	
	



Sentido San José - Guápiles



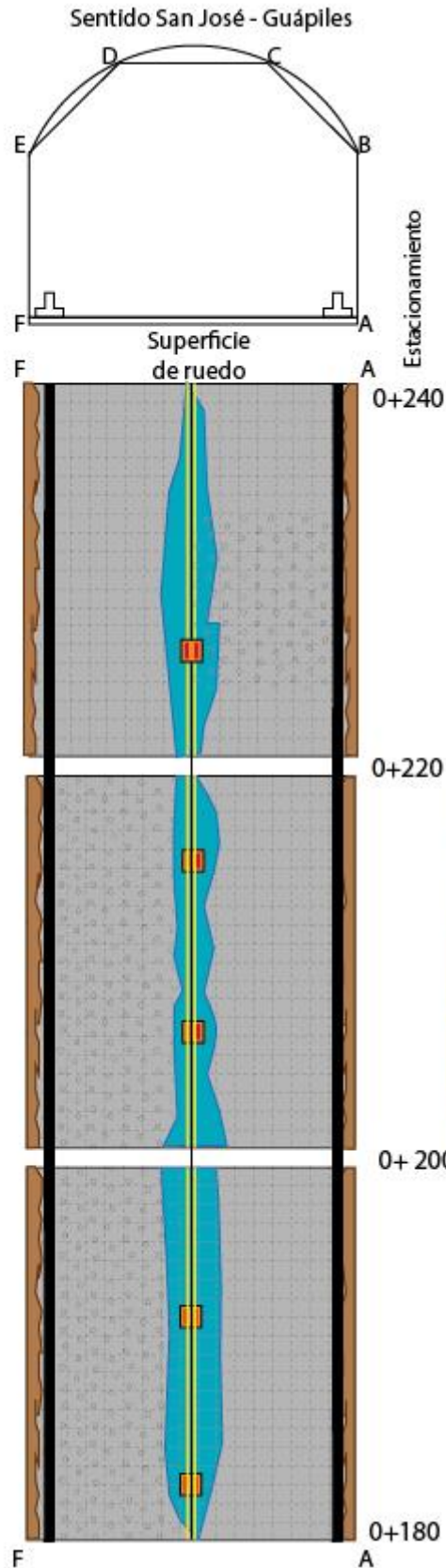

LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Evaluación de Túnel Zurquí 2017
LanammeUCR UGERVN






Simbología


- | | | |
|---------------------------|---------------|------------------|
| Precipitaciones calcáreas | Grietas | Humedad en borde |
| Acero expuesto | Goteo Leve | Humedad |
| Goteo | Goteo Intenso | Eflorescencia |

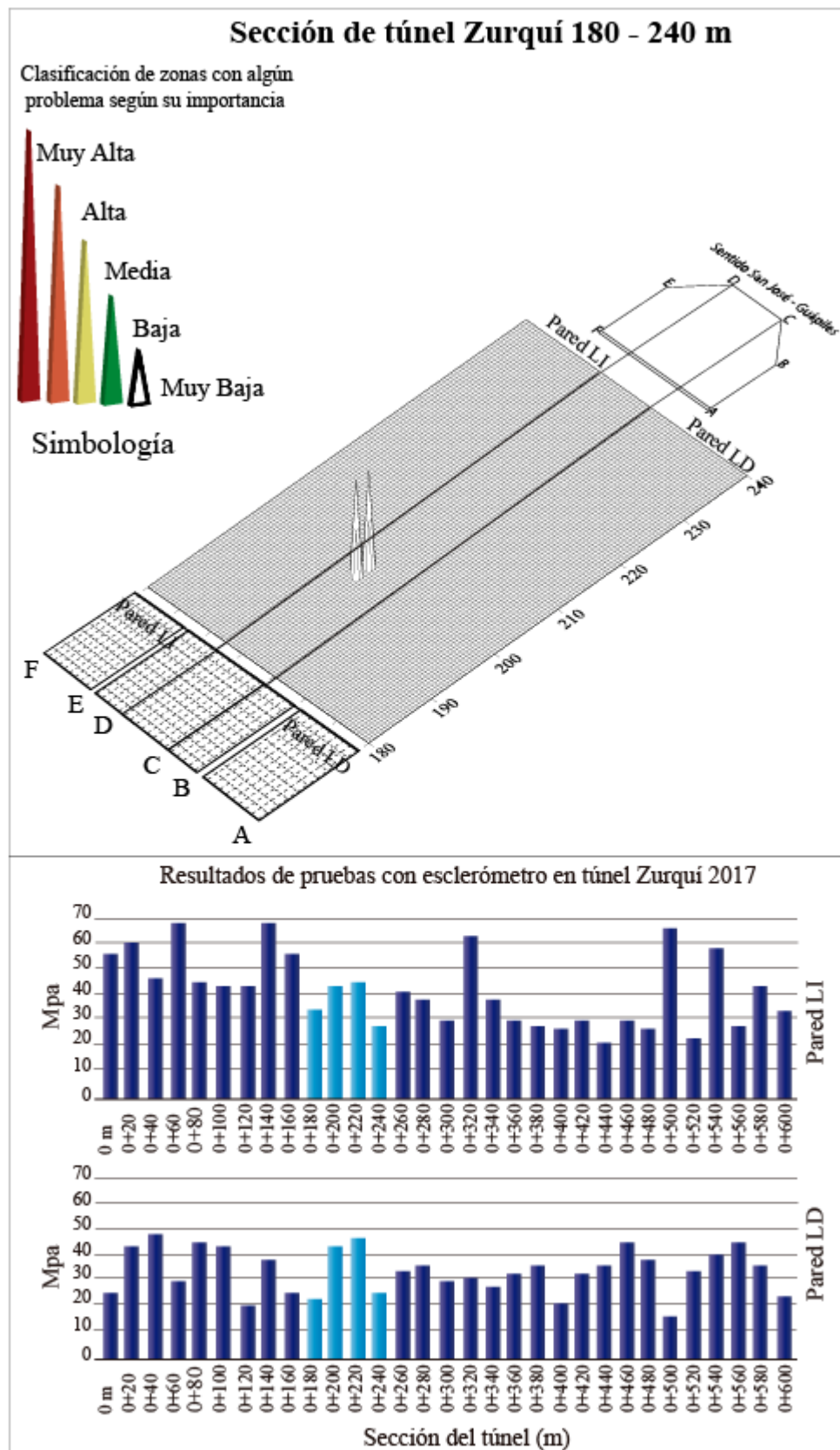
Fotos	1: poca importancia 2: media importancia 3: alta importancia 4: muy alta importancia
	Notas
G.L. en el techo no vienen de la corona del túnel sino de las luces.	



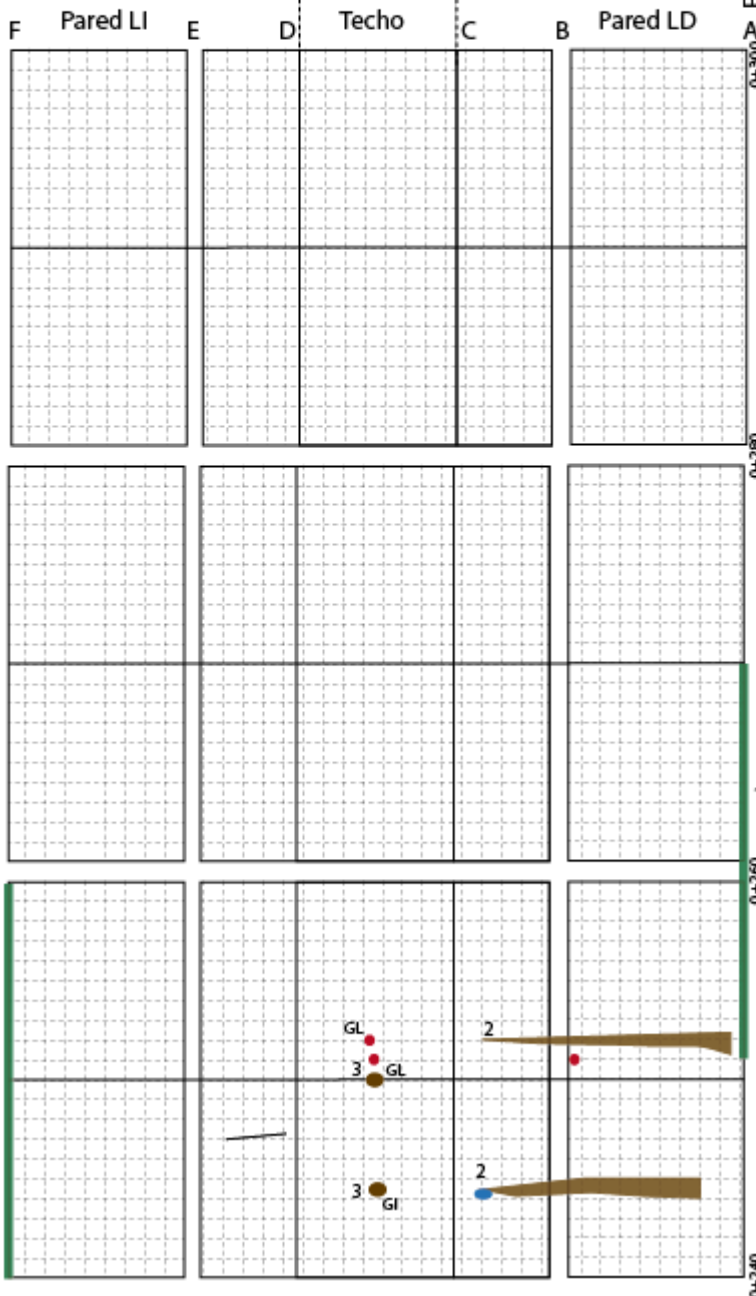
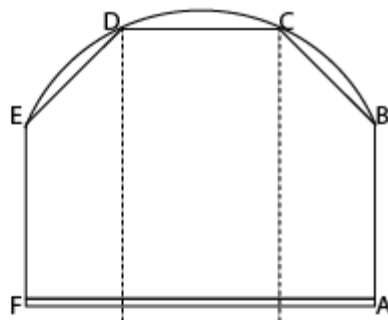
Simbología

-  Falta de Captaluces
-  Desprendimiento de asfalto
-  Superficie siempre húmeda por goteo
-  Acumulación de sedimentos
-  Desprendimiento

Fotos	Estado
Notas:	
	



Sentido San José - Guápiles




LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Evaluación de Túnel Zurquí 2017
LanammeUCR UGERVN

Simbología

-  Precipitaciones calcáreas
-  Acero expuesto
-  Goteo
-  Grietas
-  Goteo Leve
-  Goteo Intenso
-  Humedad
-  Humedad en borde
-  Eflorescencia

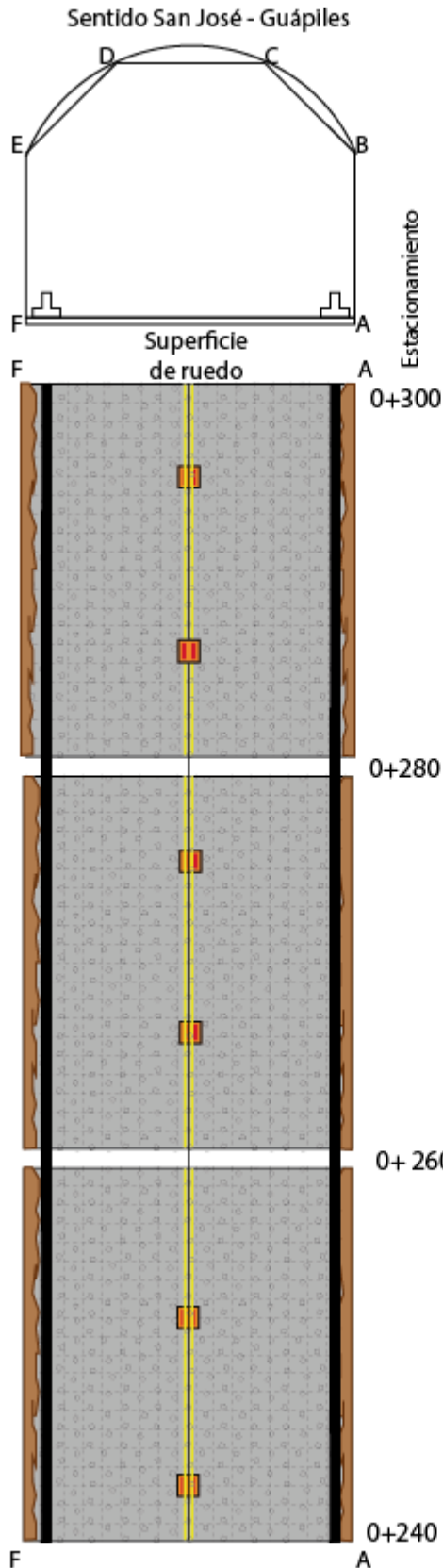
- Fotos
- 1: poca importancia
 - 2: media importancia
 - 3: alta importancia
 - 4: muy alta importancia

Notas






Tubo de la lámpara en 0+250 se encuentra caído



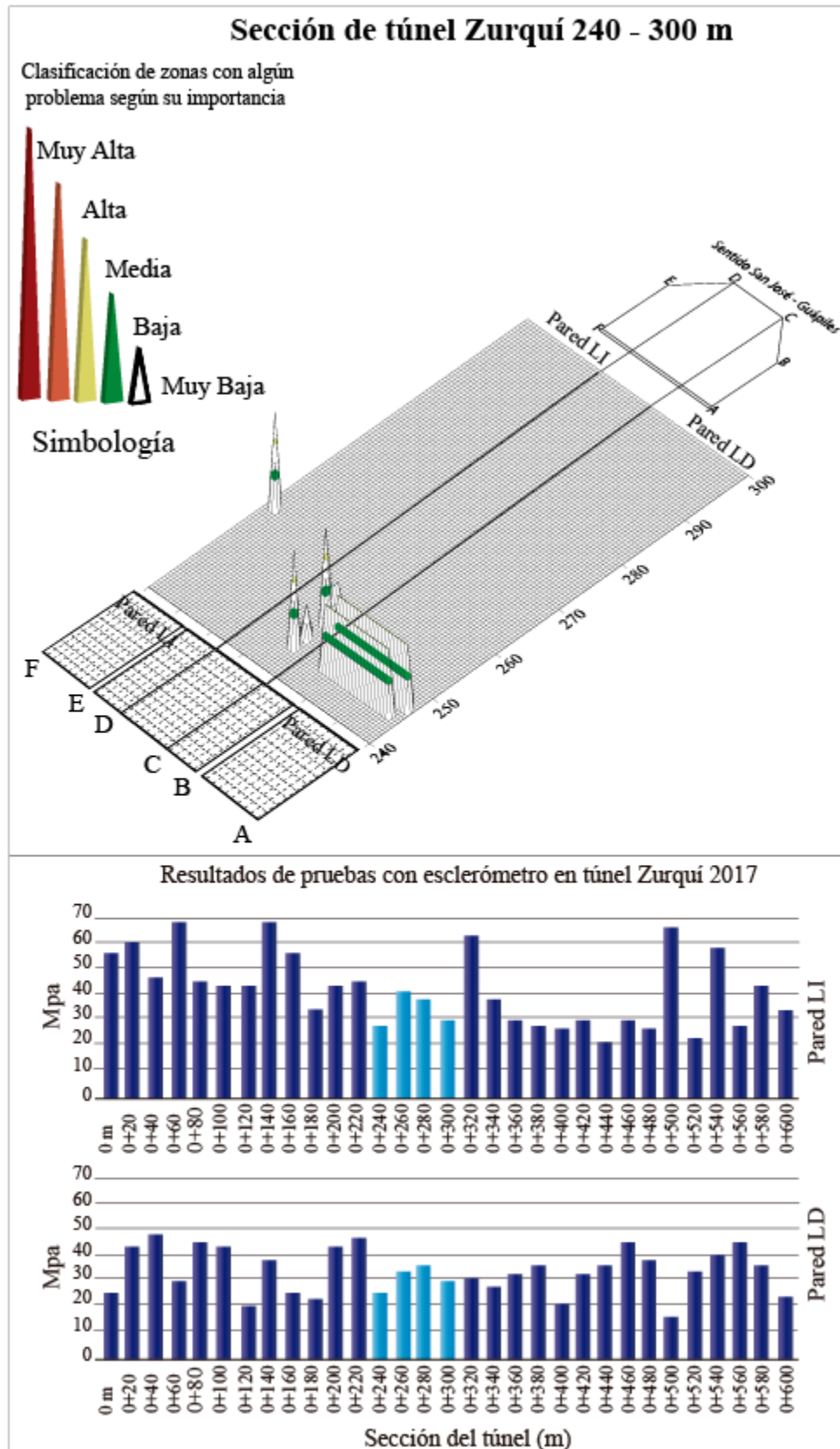
F# 8473

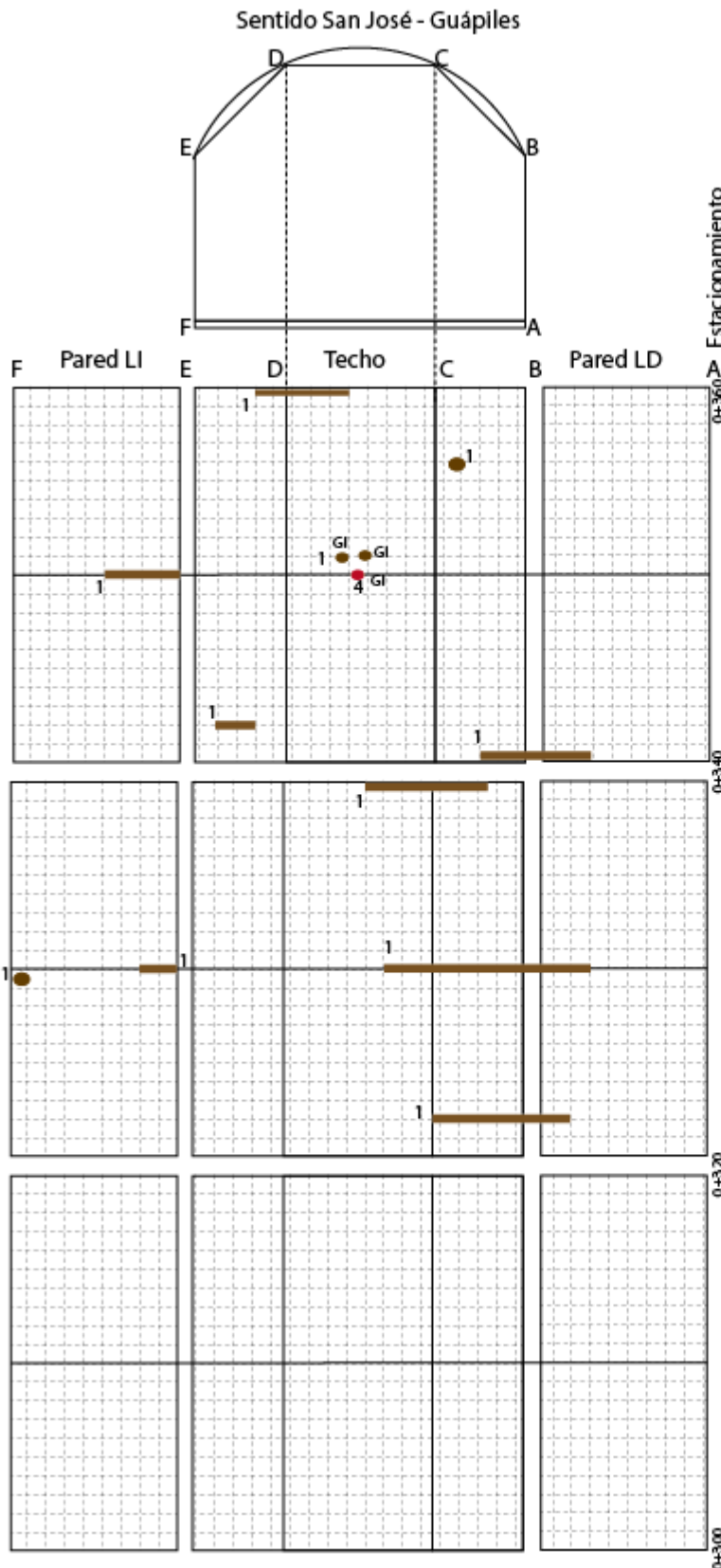


Simbología

-  Falta de Captaluces
-  Desprendimiento de asfalto
-  Superficie siempre húmeda por goteo
-  Acumulación de sedimentos
-  Desprendimiento

Fotos Estado
<p>Notas:</p>






**LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES**

Evaluación de Túnel Zurquí 2017
LanammeUCR UGERVN

Simbología

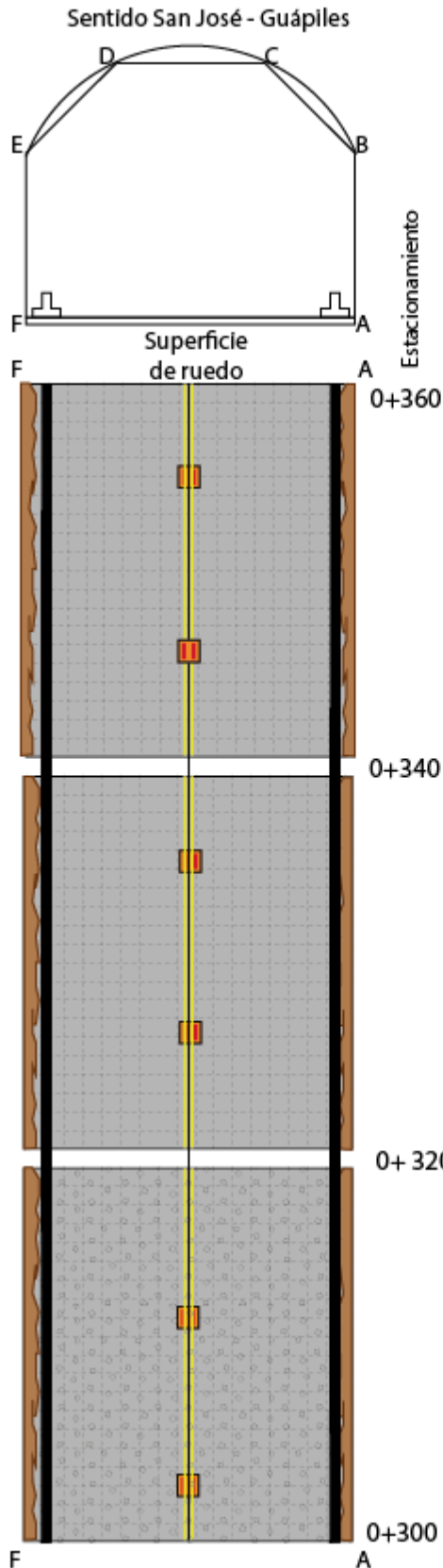
- | | | |
|---------------------------|---------------|------------------|
| Precipitaciones calcáreas | Grietas | Humedad en borde |
| Acero expuesto | Goteo Leve | Humedad |
| Goteo | Goteo Intenso | Eflorescencia |

F# 8477






- Fotos**
- 1: poca importancia
 - 2: media importancia
 - 3: alta importancia
 - 4: muy alta importancia

Notas

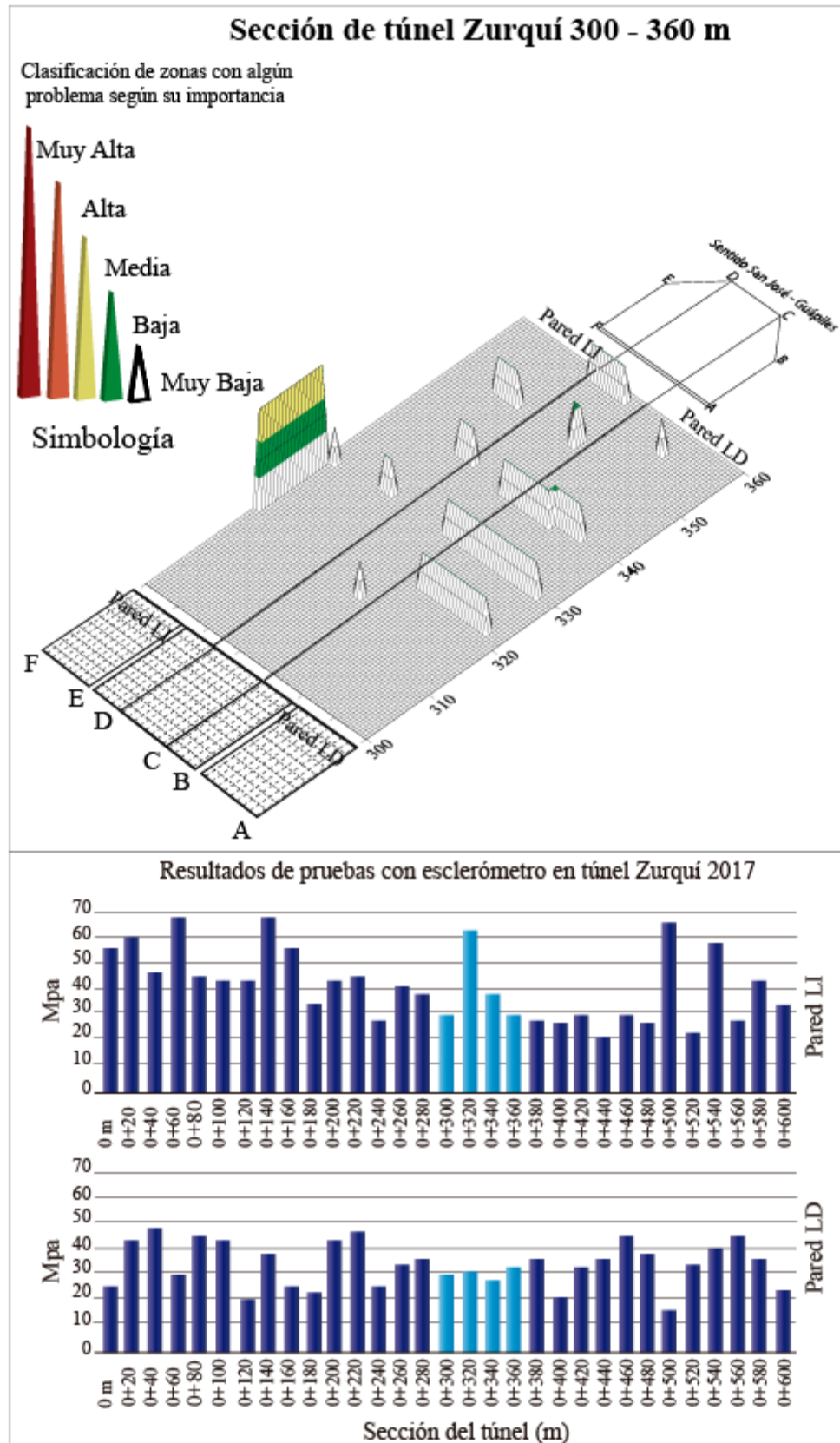




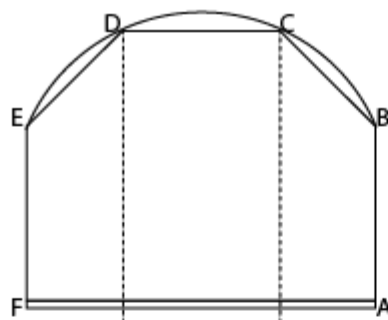
Simbología

-  Falta de Captaluces
-  Desprendimiento de asfalto
-  Superficie siempre húmeda por goteo
-  Acumulación de sedimentos
-  Desprendimiento medio

Fotos	Estado
<p>Notas:</p>	



Sentido San José - Guápiles



F	E	D	C	B	A
Pared LI		Techo		Pared LD	Estacionamiento
					0+420
			GL 1	2	0+400
					0+380
				1	0+360
1 H					0+340



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Evaluación de Túnel Zurquí 2017
LanammeUCR UGERVN


Simbología

Precipitaciones calcáreas	Grietas	Humedad en borde
Acero expuesto	Goteo Leve	Humedad
Goteo	Goteo Intenso	Eflorescencia

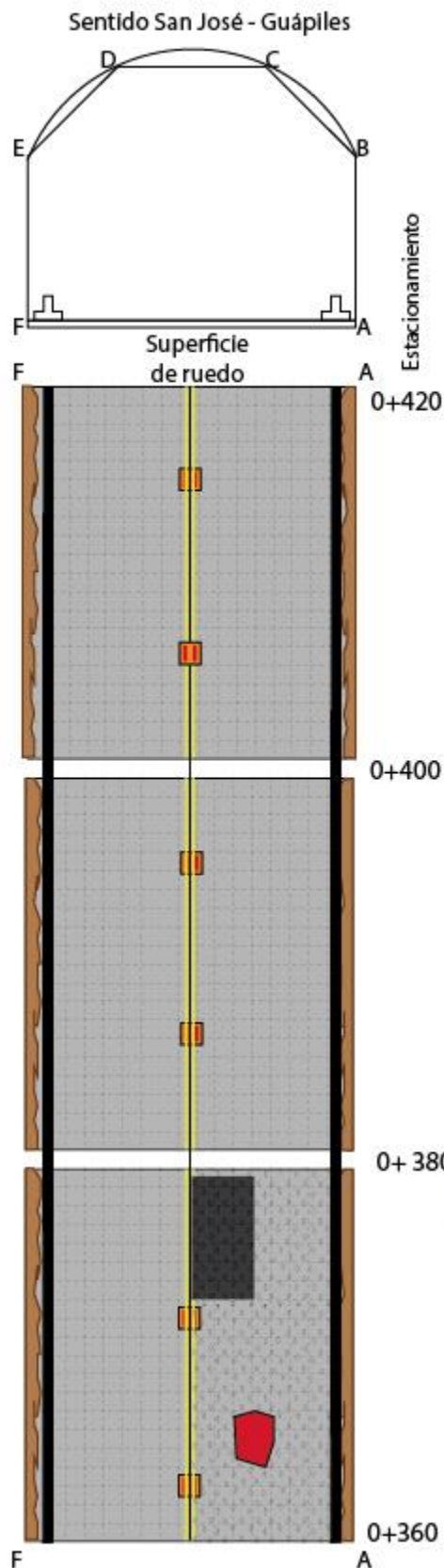
Fotos 1: poca importancia
2: media importancia
3: alta importancia
4: muy alta importancia

Notas

F# 8480



Techo del túnel con acumulación de sales









LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

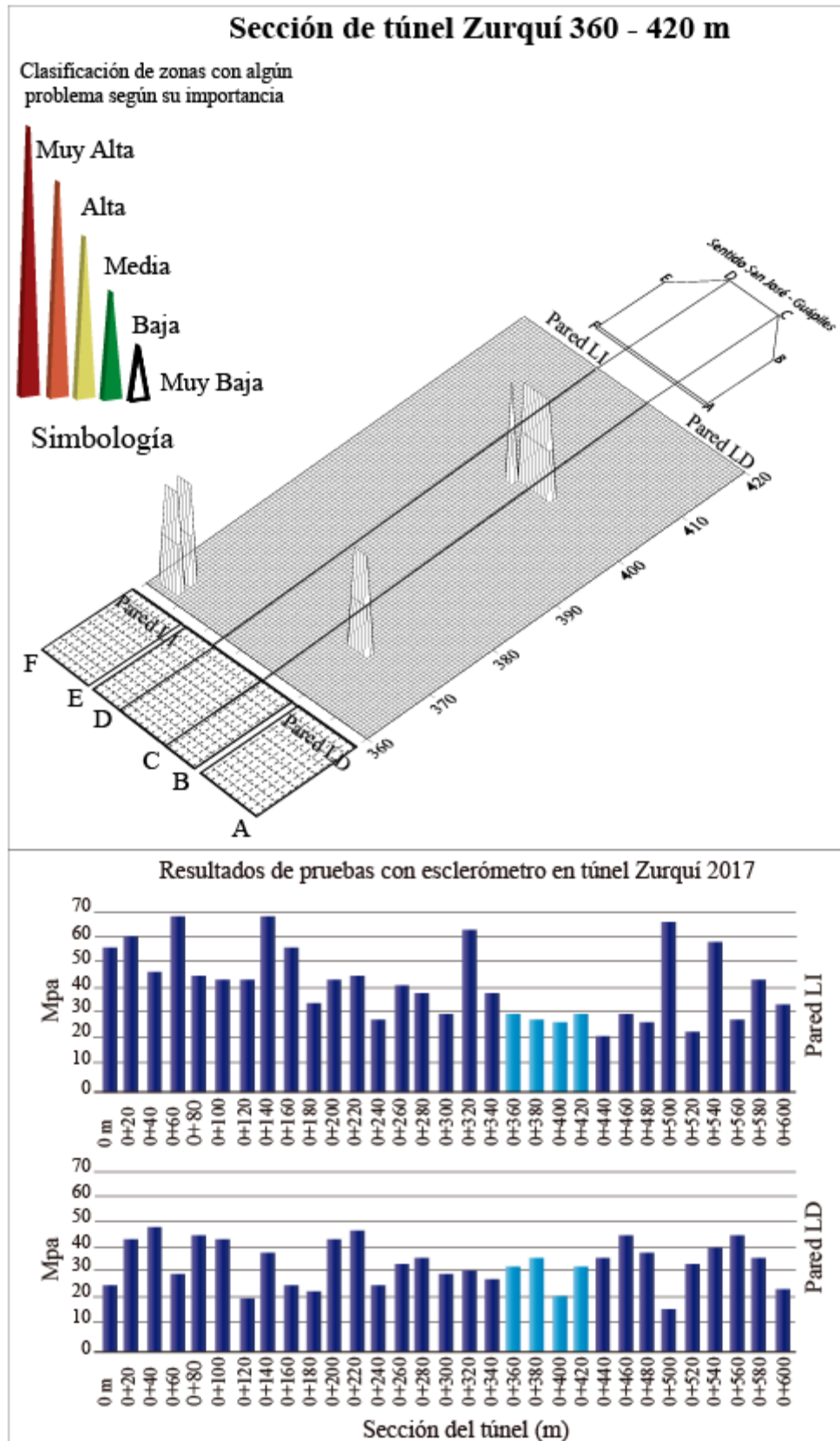
LanammeUCR

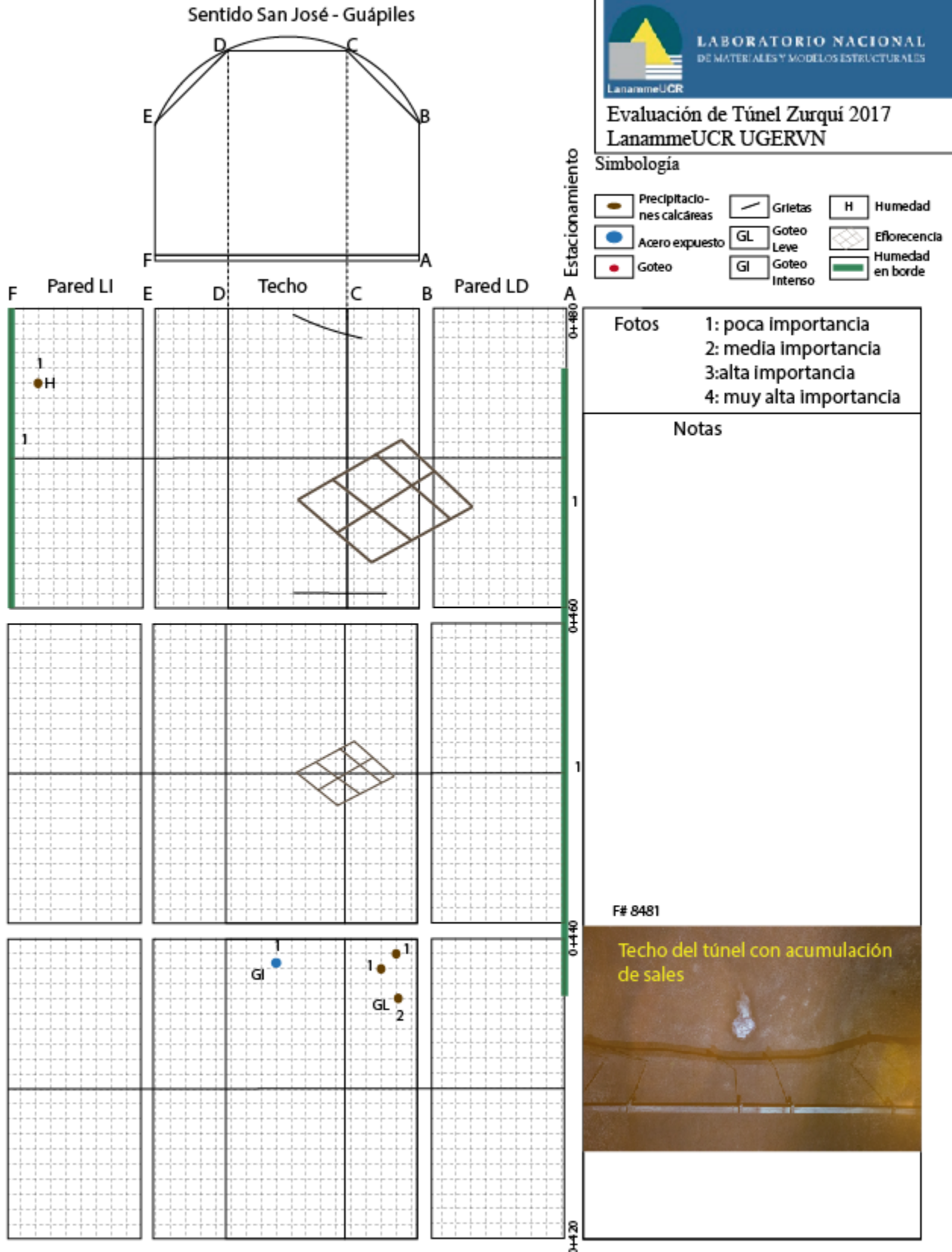
Evaluación de Túnel Zurquí 2017
LanammeUCR UGERVN

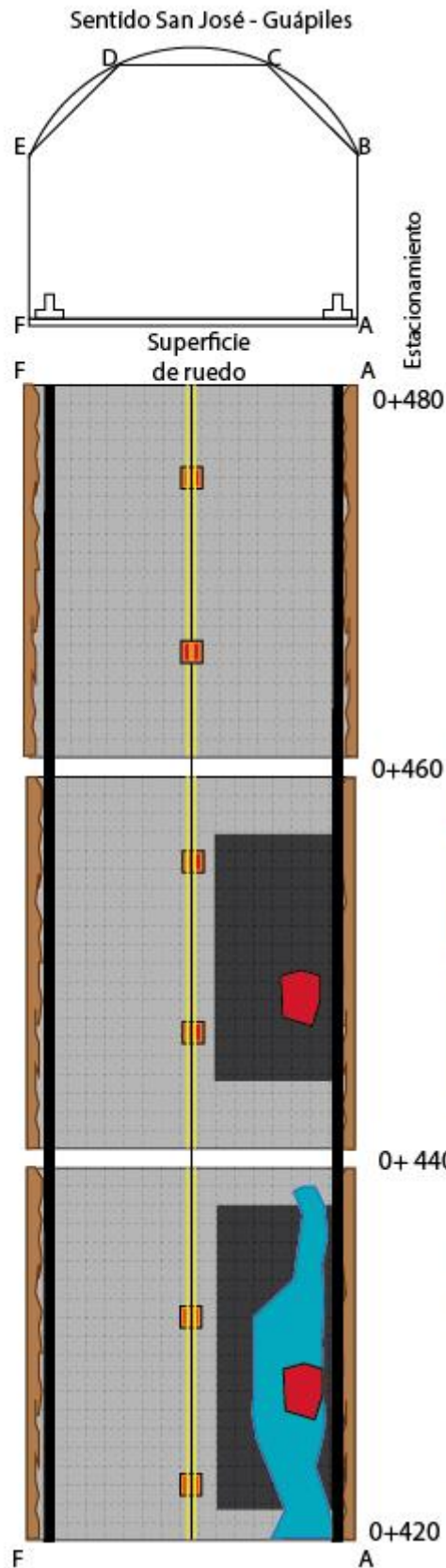
Simbología

-  Falta de Captaluces
-  Desprendimiento de asfalto (hueco)
-  Superficie siempre húmeda por goteo
-  Acumulación de sedimentos
-  Desprendimiento medio

Fotos Estado
<p>Notas:</p>
 <p>Desprendimiento de asfalto (hueco)</p>














LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

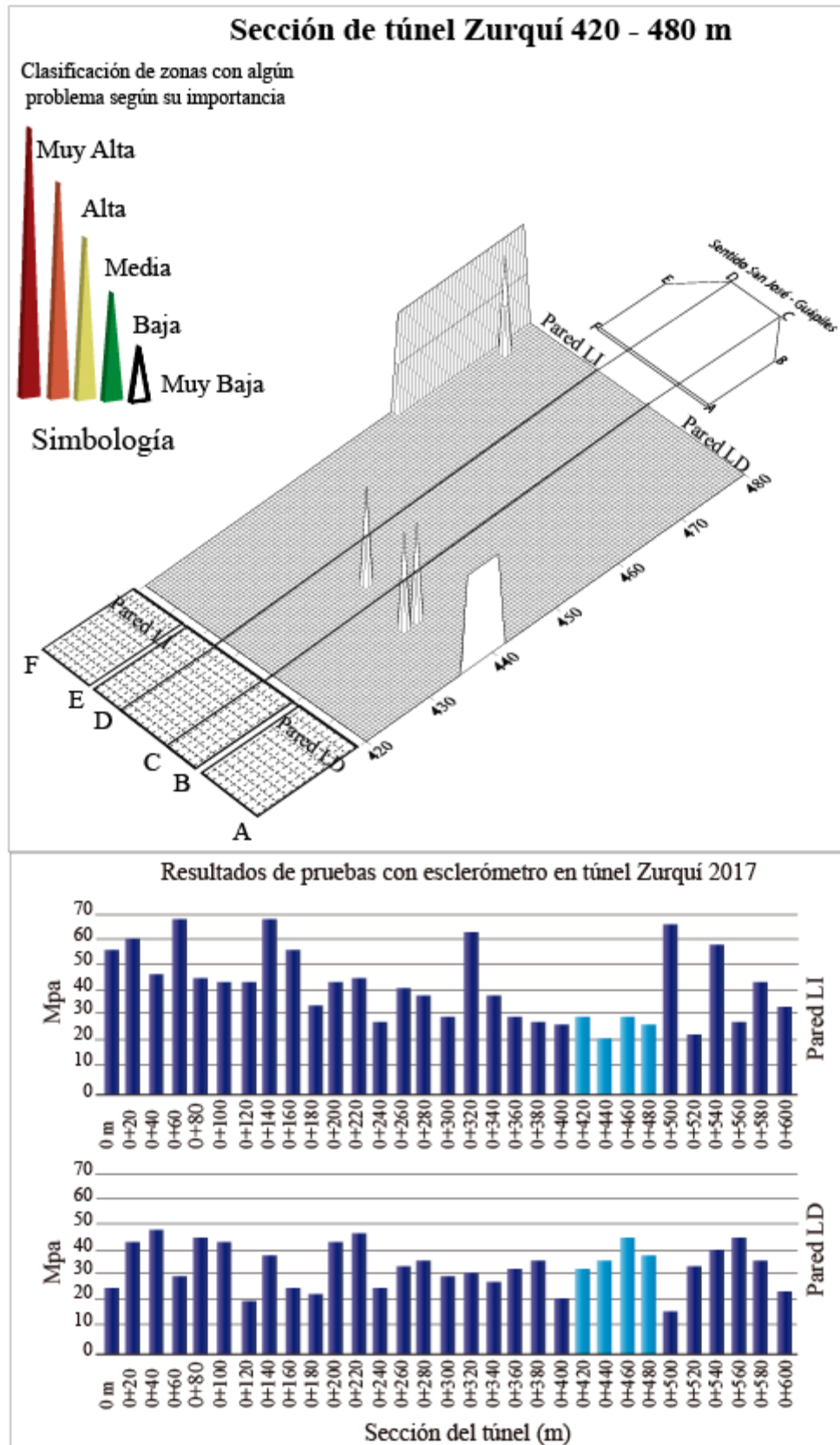
Evaluación de Túnel Zurquí 2017
LanammeUCR UGERVN

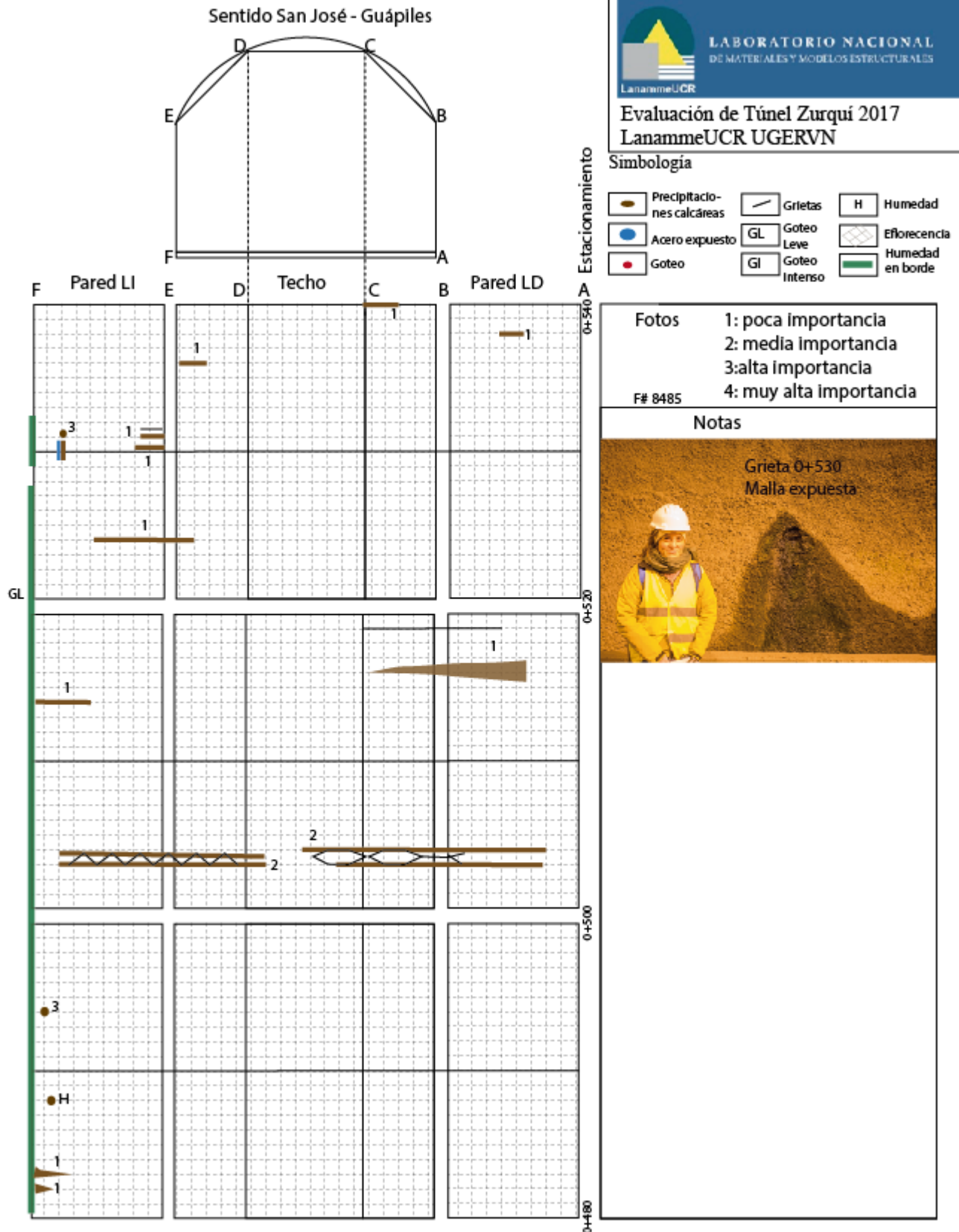
Simbología

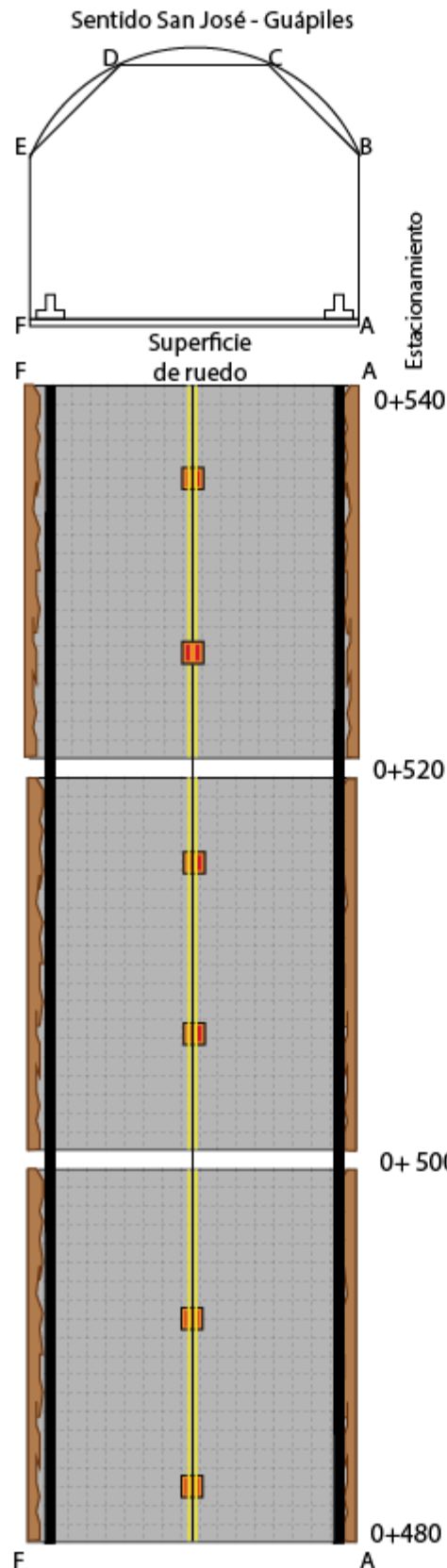
-  Falta de Captaluces
-  Desprendimiento de asfalto (hueco)
-  Superficie siempre húmeda por goteo
-  Acumulación de sedimentos
-  Desprendimiento medio
-  Bacheo

Fotos Estado
<p>Notas:</p>











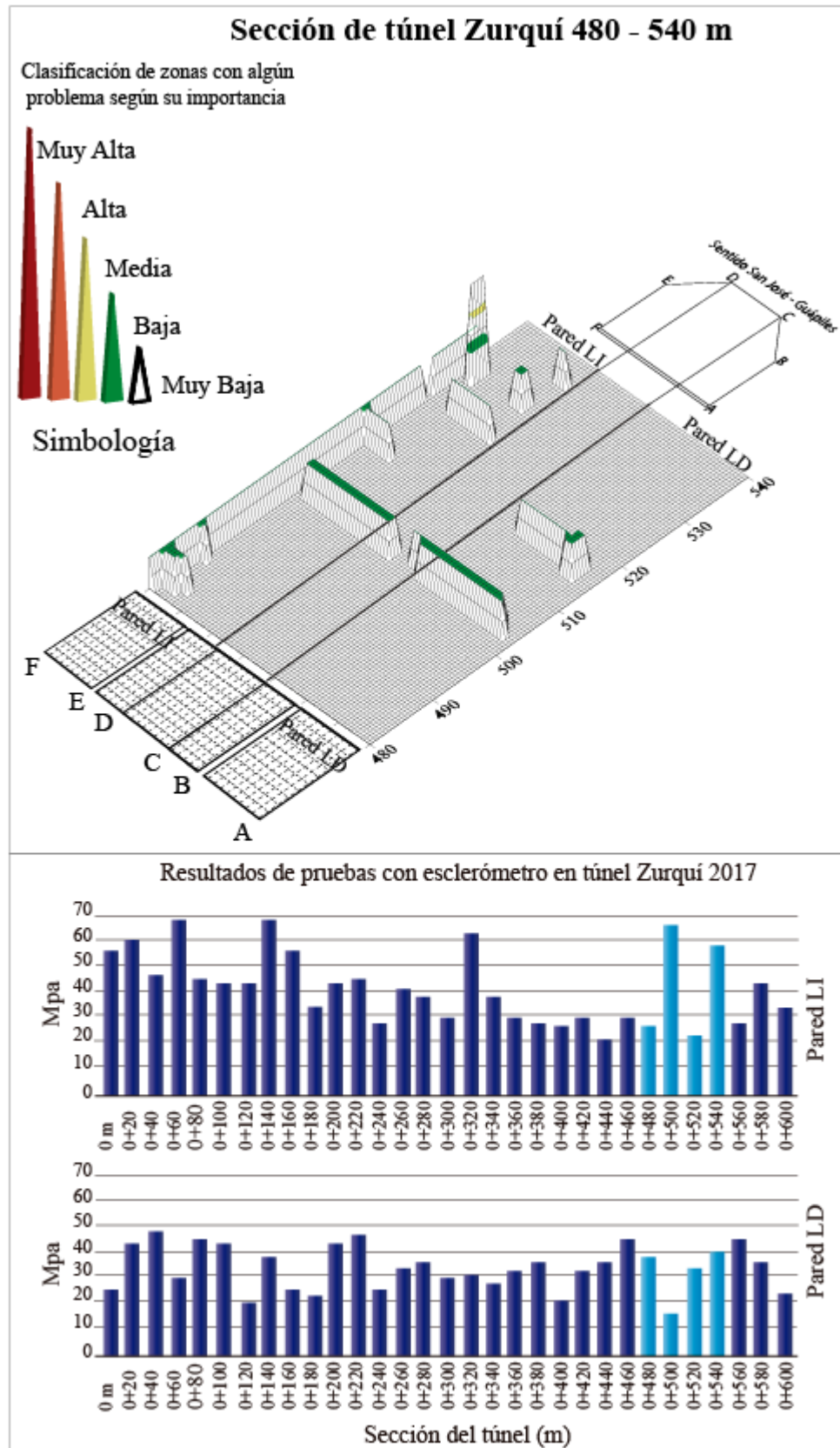




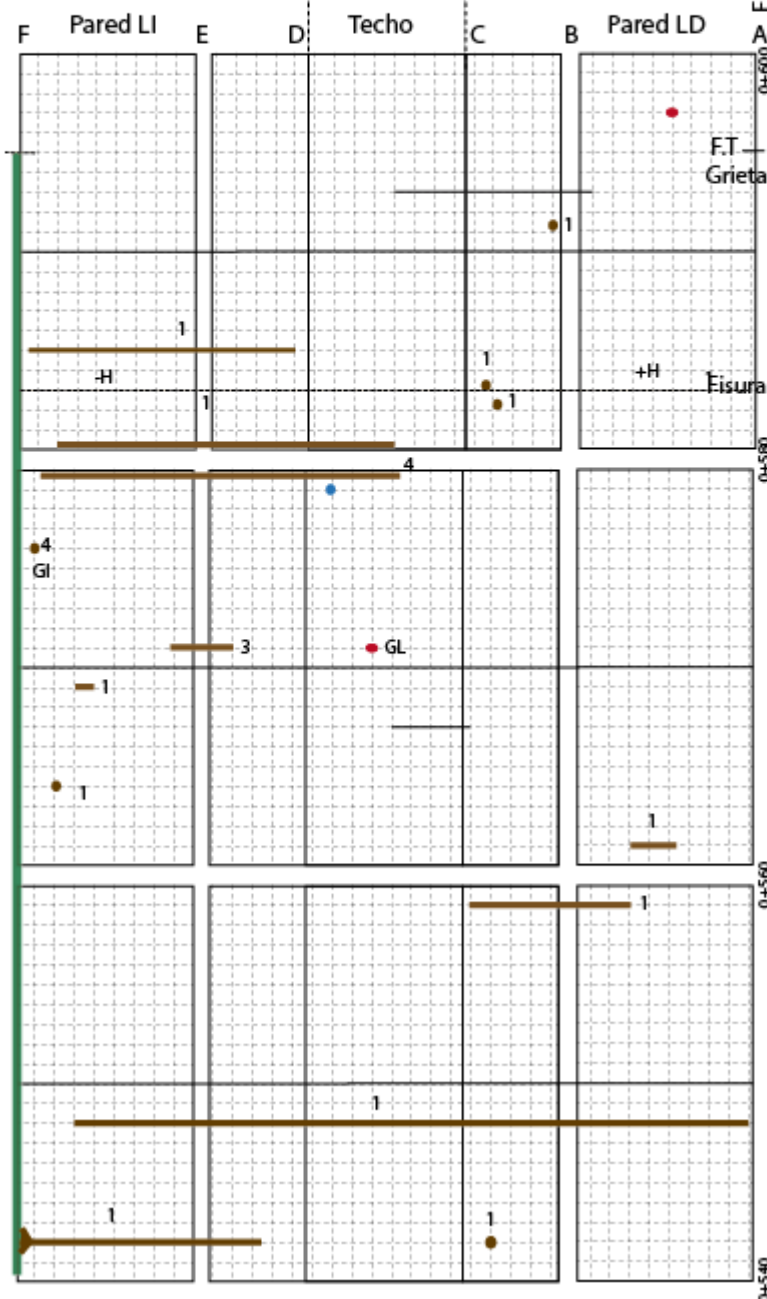
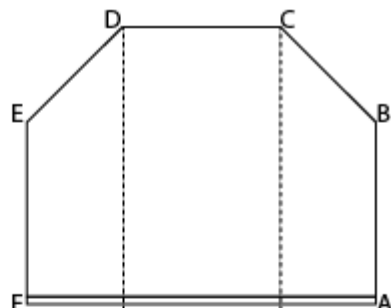
Simbología

-  Falta de Captaluces
-  Desprendimiento de asfalto (hueco)
-  Superficie siempre húmeda por goteo
-  Acumulación de sedimentos
-  Desprendimiento medio
-  Bacheo

Fotos	Estado
Notas:	



Sentido San José - Guápiles




LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Evaluación de Túnel Zurquí 2017
LanammeUCR UGERVN

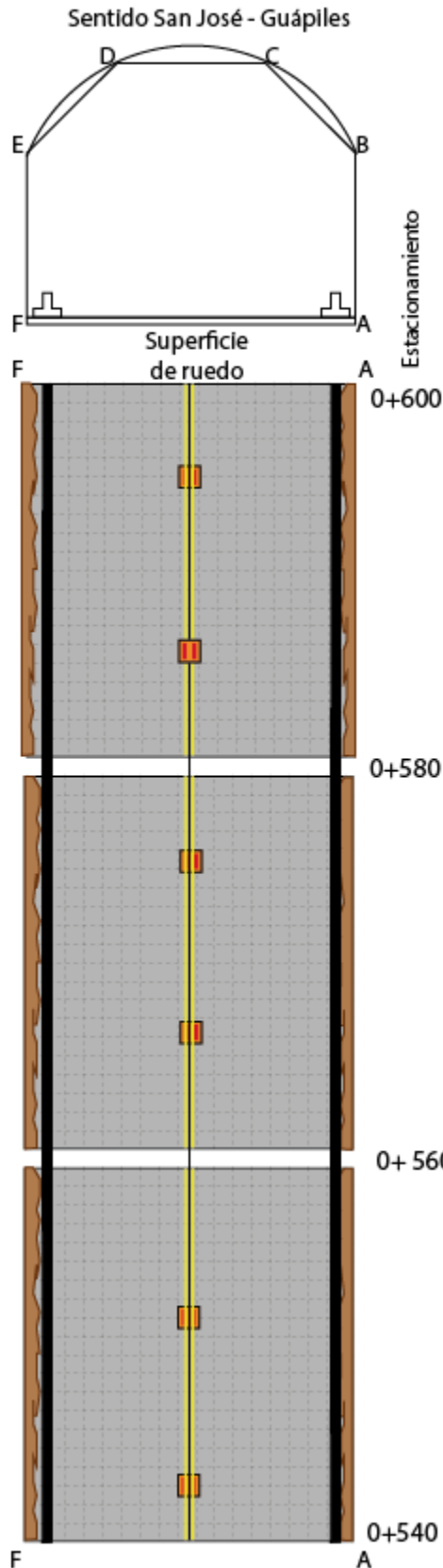
Simbología

Precipitaciones calcáreas	Grietas	Humedad
Acero expuesto	Goteo Leve	Eflorescencia
Goteo	Goteo Intenso	Humedad en borde







- Fotos
- 1: poca importancia
 - 2: media importancia
 - 3: alta importancia
 - 4: muy alta importancia

Notas





Simbología

-  Falta de Captaluces
-  Desprendimiento de asfalto (hueco)
-  Superficie siempre húmeda por goteo
-  Acumulación de sedimentos
-  Desprendimiento medio
-  Bacheo

Fotos	Estado
<p>Notas:</p>	

