



Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales

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

**INFORME DE EVALUACIÓN Y FISCALIZACIÓN
RUTA NACIONAL No.27
TALUDES KM 38+600**

LM-PI-UGERVN-008-2015

San José, Costa Rica
Noviembre, 2015



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.

INFORME DE EVALUACIÓN Y FISCALIZACIÓN, RUTA NACIONAL No.27 TALUDES KM 38+600 LM-PI-UGERVN-008-2015

Ruiz-Cubillo, Paulo¹; Naranjo-Ureña, Ronald²; Valverde-Cordero, Cristian³; Sanabria-Sandino, Jairo⁴; Vega-Salas, Paul⁵; Agüero-Barrantes, Pablo⁶; Barrantes-Jiménez, Roy⁷ y Loria-Salazar, Luis Guillermo⁸

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

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

³ Ingeniero Evaluador Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional PITRA LanammeUCR

⁴ Ingeniero Evaluador Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional PITRA LanammeUCR

⁵ Geógrafo Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional PITRA LanammeUCR

⁶ Ingeniero Evaluador Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional PITRA LanammeUCR

⁷ Coordinador Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional LanammeUCR

⁸ Coordinador General Programa de Infraestructura del Transporte LanammeUCR

Palabras Clave: PITRA, Drenaje ácido, alteración hidrotermal, ruta 27, Caldera, ácido sulfúrico, deterioro en concreto, corrosión en acero, deslizamiento

Resumen: En el presente informe se analizan varios de los factores que provocaron el deslizamiento ocurrido en el km 38+600 de la Ruta Nacional 27, específicamente el efecto del drenaje ácido de roca en el deterioro de las obras de retención y protección. Mediante un vehículo aéreo no tripulado, técnicas de foto gravimetría y software especializado, se realizó un levantamiento topográfico de la zona y se generaron modelos de elevación digital para el análisis geomorfológico del sitio. Los materiales que afloran en los taludes del corresponden con brechas alteradas hidrotermalmente, en la parte media y superior con mucha alteración y una matriz arcillosa con altos contenidos de azufre y sulfatos. La presencia de este mineral junto con otros óxidos de hierro y magnetita ha generado que al estar expuesto al oxígeno e interactuar con el agua de lluvia y escorrentía se esté generando drenaje ácido de roca. El DAR está afectando seriamente el concreto lanzado y el acero de los anclajes, aquí se demuestra el consumo del componente calcáreo en concreto por efecto del DAR y la afectación en el acero de la mallas y los anclajes. Se estudia el mecanismo de deterioro que ha provocado la caída del concreto, el suelo y las rocas del lugar. Con base en las observaciones y las pruebas realizadas se identifican otros sectores con condiciones similares al talud fallado, y que tienen alto potencial de presentar desprendimiento de concreto, suelo y rocas, con el evidente peligro que conlleva para los usuarios de la carretera. Posteriormente se analizan los informes presentados por el Concesionario de la carretera sobre este particular. Se concluye que se deben realizar estudios y diseños específicos para las condiciones particulares de estos sitios, ya que colocar nuevamente anclajes y concreto con refuerzo de acero equivale a reconstruir la vulnerabilidad del sitio y expone nuevamente a los usuarios al riesgo derivado de la caída de materiales sobre la carretera.

Referencias

1. Asociación Costarricense de Geotecnia, ACG, 2010: Reporte de Inspección Geotécnica de los taludes de corte entre las estaciones 14+000 a 52+000 Ruta 27 San José - Caldera. Publicación AGC.0110 San José Costa Rica. 49 pp.
2. PITRA., Valverde-Cordero, C., Garro-Mora, J. F., Naranjo-Ureña, R., Ruiz-Cubillo, P., Barrantes-Jiménez, R., & Loría-Salazar, L. G. (2014) Informe de Evaluación del Proyecto San José - Caldera Ruta Nacional 27, año 2013-2014. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica: Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
3. PITRA., Naranjo-Ureña, R., Barrantes-Jiménez, R., & Loría-Salazar, L. G. (2013) Informe de corto de fiscalización, Ruta Nacional 27 talud en estacionamiento 38+500. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica: Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
4. PITRA., Valverde-Cordero, C., Garro-Mora, J. F., Naranjo-Ureña, R., Ruiz-Cubillo, P., Villalobos-Vega, E., Barrantes-Jiménez, R., & Loría-Salazar, L. G. (2015) Informe de Evaluación del Proyecto San José - Caldera Ruta Nacional 27, año 2014-2015. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica: Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
5. PITRA., Ruiz-Cubillo, P., Naranjo-Ureña, R., Valverde-Cordero, C., Garro-Mora, J. F., Barrantes-Jiménez, R., & Loría-Salazar, L. G. (2015) Estudio de presencia de drenaje ácido de rocas (DAR) en taludes de la Ruta Nacional 27, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica: Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.

Ruiz-Cubillo, P., Naranjo-Ureña, R., Valverde-Cordero, C., Sanabria-Sandino, J., Vega-Salas, P., Agüero-Barrantes, P., y otros. (2015). *INFORME DE EVALUACIÓN Y FISCALIZACIÓN, RUTA NACIONAL No.27 TALUDES KM 38+600 - LM-PI-UGERVN-008-2015*. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica: Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.

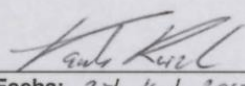
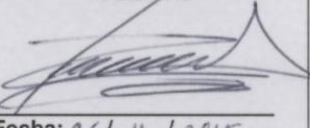


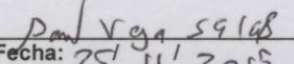
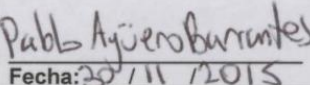
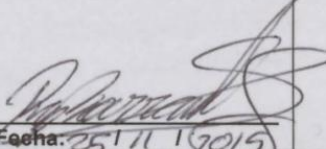
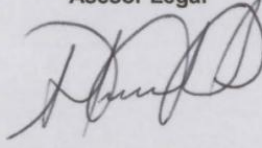
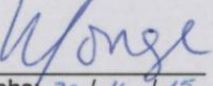
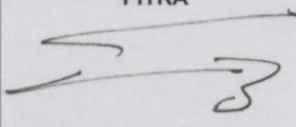
1. Informe LM-PI-UGERVN-008-2015		2. Copia No.1	
3. Título INFORME DE EVALUACIÓN Y FISCALIZACIÓN TALUDES DEL KM 38+600 DE LA RUTA NACIONAL No.27		4. Fecha del Informe Noviembre, 2015	
5. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad 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 En el presente informe se analizan varios de los factores que provocaron el deslizamiento ocurrido en el km 38+600 de la Ruta Nacional 27, específicamente el efecto del drenaje ácido de roca en el deterioro de las obras de retención y protección. Mediante un vehículo aéreo no tripulado, técnicas de foto gravimetría y software especializado, se realizó un levantamiento topográfico de la zona y se generaron modelos de elevación digital para el análisis geomorfológico del sitio. Los materiales que afloran en los taludes del corresponden con brechas alteradas hidrotermalmente, en la parte media y superior con mucha alteración y una matriz arcillosa con altos contenidos de azufre y sulfatos. La presencia de este mineral junto con otros óxidos de hierro y magnetita ha generado que al estar expuesto al oxígeno e interactuar con el agua de lluvia y escorrentía se esté generando drenaje ácido de roca. El DAR está afectando seriamente el concreto lanzado y el acero de los anclajes, aquí se demuestra el consumo del componente calcáreo en concreto por efecto del DAR y la afectación en el acero de la mallas y los anclajes. Se estudia el mecanismo de deterioro que ha provocado la caída del concreto, el suelo y las rocas del lugar. Con base en las observaciones y las pruebas realizadas se identifican otros sectores con condiciones similares al talud fallado, y que tienen alto potencial de presentar desprendimiento de concreto, suelo y rocas, con el evidente peligro que conlleva para los usuarios de la carretera. Posteriormente se analizan los informes presentados por el Concesionario de la carretera sobre este particular. Se concluye que se deben realizar estudios y diseños específicos para las condiciones particulares de estos sitios, ya que colocar nuevamente anclajes y concreto con refuerzo de acero equivale a reconstruir la vulnerabilidad del sitio y expone nuevamente a los usuarios al riesgo derivado de la caída de materiales sobre la carretera.			
8. Palabras clave Drenaje ácido, alteración hidrotermal, ruta 27, Caldera, ácido sulfúrico, deterioro en concreto, corrosión en acero, deslizamiento		9. Nivel de seguridad: Bajo	10. Núm. de páginas 112
11. Preparado por:			
Geólogo Paulo Ruiz C., Ph.D. UGERVN  Fecha: 27/11/2015	Ing. Ronald Naranjo U. UGERVN  Fecha: 26/11/2015	Ing. Christian Valverde C. UGERVN  Fecha: 25/11/2015	Ing. Jairo Sanabria S. UGERVN  Fecha: 25/11/2015
Geógrafo Paul Vega S. M.Sc. UGERVN  Fecha: 25/11/2015	Ing. Pablo Agüero B. UP  Fecha: 20/11/2015	Ing. Roy Barrantes J. Coordinador UGERVN  Fecha: 25/11/2015	
12. Revisado por:		13. Aprobado por:	
Lic. Miguel Chacón A. Asesor Legal  Fecha: 30/11/15	Ing. William Vargas M., Ph.D. Coordinador Programa de Ingeniería Sísmica  Fecha: 30/11/15	Ing. Guillermo Loría S., Ph.D. Coordinador General PITRA  Fecha: 30/11/15	

TABLA DE CONTENIDO

1. POTESTADES	7
2. INTRODUCCIÓN	7
3. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	8
4. OBJETIVO GENERAL DEL ESTUDIO	10
5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
6. METODOLOGÍA	11
6.1 Levantamiento topográfico en detalle mediante VANT	11
6.2 Muestreo y caracterización de materiales para pH en pasta.....	11
6.3 Mediciones pH en pasta en el laboratorio.....	12
7. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DEL KM 38+600	14
7.1 Morfología de taludes	14
7.2 Geología y petrografía.....	18
7.3 Determinación del proceso de drenaje ácido de roca	19
7.3.1 <i>ASPECTOS MINERALÓGICOS</i>	20
7.3.2 <i>RESULTADOS DE MEDICIONES DE PH DEL AGUA SUPERFICIAL DEL SITIO</i>	21
7.3.3 <i>RESULTADOS DE LAS MEDICIONES DE PH EN PASTA</i>	22
7.3.4 <i>CONCLUSIÓN SOBRE PRESENCIA DE DAR EN EL KM 38+600</i>	25
7.4 Descripción del deslizamiento del talud del km 38+600.....	25
7.5 Efecto del DAR en el deterioro del concreto lanzado en el talud del km 38+600	28
7.5.1 <i>CONDICIÓN DEL CONCRETO LANZADO</i>	28
7.5.2 <i>INTERACCIÓN QUÍMICA QUE ENTRE DAR Y CONCRETO</i>	38
7.5.3 <i>PRUEBA DE DETERMINACIÓN DE CONSUMO DE CARBONATOS EN CONCRETO</i>	39
7.6 Afectación en el acero producto del DAR	44
7.6.1 <i>DESCRIPCIÓN DE OXIDACIÓN Y CORROSIÓN</i>	44
7.6.2 <i>EVALUACIÓN DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL</i>	51
7.6.3 <i>RESISTENCIA A LA TENSIÓN</i>	58
7.7 Mecanismo de deterioro y falla del talud 38+600.....	63
7.8 <i>OTROS SECTORES AFECTADOS POR DAR</i>	66

8. OBSERVACIONES SOBRE LOS INFORMES DE LA CONCESIONARIA	72
8.1 Línea de tiempo de la RN-27 y taludes con alteración hidrotermal y/o DAR.	73
8.2 Observaciones sobre el primer informe de la Concesionaria	77
8.3 Observaciones sobre el segundo informe de la Concesionaria	89
9. CONCLUSIONES	102
10. RECOMENDACIONES	105
11. AGRADECIMIENTOS	107
12. REFERENCIAS	107
ANEXO	112



1. POTESTADES

El Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, 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 identificación y el entendimiento de los mecanismos y procesos químicos y físicos que alteran los materiales de los taludes en las carreteras y los materiales que son empleados en las obras de protección y estabilización, permiten evaluar la condición de estas obras de infraestructura y fiscalizar las intervenciones realizadas, en este caso, por el Concesionario de la carretera.

Desde su construcción la Ruta Nacional No.27 (RN-27) ha presentado problemas de estabilidad en varios sectores, provocando deterioro en las obras geotécnicas y deslizamientos con consecuencias negativas para los usuarios como la interrupción del tránsito vehicular y en el peor de los casos fatalidades.

Por lo tanto, los aportes científicos y técnicos derivados del presente informe se enmarcan dentro de las funciones que la ley N°8114 le confiere al LanammeUCR y representan los principios de investigación, acción social y transferencia de tecnología.

2. INTRODUCCIÓN

La RN-27 fue construida con el propósito de comunicar el Valle Central con la costa Pacífica y mejorar el dinamismo económico del país. Desde su construcción y posterior a su inauguración en el año 2010, la RN-27 ha presentado en varios taludes problemas recurrentes de estabilidad que han sido asociados con taludes de elevada pendiente, rocas alteradas hidrotermalmente y sistemas de manejo de aguas superficiales ineficientes, entre otras causas (ACG 2010; Porrás et al., 2012; Informes INF-PITRA-001-2013, LM-PI-UGERVN-007-2013, INF-PI-UGERVN-005-2014).

Además de las razones antes mencionadas como variables de inestabilidad, en algunos sitios las soluciones geotécnicas que se han implementado para estabilizar los taludes no siempre responden a las características físicas y químicas del suelo y las rocas presentes en cada sitio. El colapso del talud ubicado en el km 38+600 a inicios del mes de agosto del presente año, pone en evidencia este problema, que se repite en otros sitios de la ruta que ya han sido identificados en informes anteriores (LM-PI-UGERVN-003-2015).

En este informe se analizan las principales características geomorfológicas de los taludes del km 38+600. Se hace una caracterización geológica general de las rocas presentes y se determina la presencia de drenaje ácido de roca (DAR) en el sitio, ya que se le considera una variable importante en el colapso del concreto lanzado que había sido empleado como parte del sistema de estabilización y protección del talud. Luego de confirmar la presencia de DAR en el sitio, se describe la condición actual del talud y los deterioros observados en el concreto lanzado, el acero de las mallas electrosoldadas y anclajes, los cuales fueron colocados como parte de las obras de protección y estabilización del talud. Finalmente, se analizan los informes remitidos por el Consejo Nacional de Concesiones, los cuales fueron preparados por el Concesionario de la ruta, así como un informe de la Supervisora del proyecto, el Consorcio Getinsa - Gabinete S.A., con respecto al DAR en los taludes de la RN-27 y la condición de las obras en el talud del km 38+600.

3. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica entre Escobal y Orotina sobre la RN-27, según se muestra en la figura 1. Dentro de la clasificación de zonas de vida de Holdridge para Costa Rica, la zona de estudio corresponde con un Bosque Húmedo Tropical (bh-T) donde las temperaturas superan los 24°C la mayor parte del año, hay un promedio anual de lluvia de entre 1800 y 4000 mm (Holdridge, 1967), y presenta una estación seca bien marcada que puede extenderse hasta por 5 meses, usualmente entre Diciembre y Abril/Mayo.

Específicamente, en la zona de estudio este año en promedio no ha sido particularmente lluvioso, pero se han presentado algunos eventos de alta intensidad de lluvia. El deslizamiento del talud en el km 38+600 se dio el día 9 de agosto del presente año, en ese mes se reportan 130.8 mm de lluvia

acumulada para la estación ubicada en La Universidad Técnica Nacional en Balsa, Atenas y que se encuentra a 3.5 km del sitio de estudio (Instituto Meteorológico Nacional 2015).

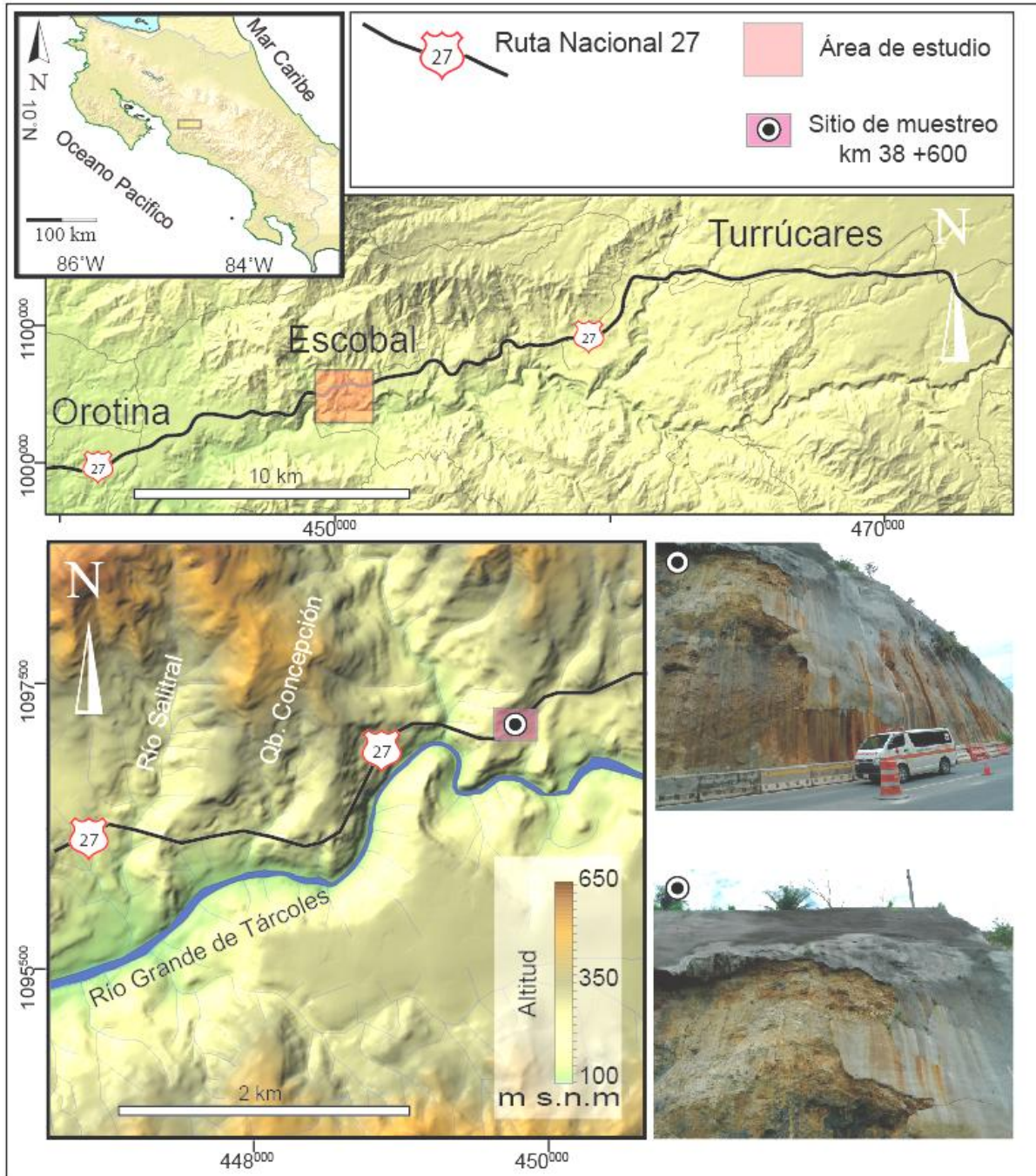


Figura 1. Ubicación del área de estudio sobre un modelo de elevación digital con altitud. En el sitio del estacionamiento km 38+600 se tomaron muestras de suelo, rocas y concreto. (Coordenadas CRTM-2005).

4. OBJETIVO GENERAL DEL ESTUDIO

Se propuso como objetivo general del estudio determinar la influencia que el drenaje ácido de rocas ha tenido en el deterioro y en los deslizamientos del talud del km 38+600, en la Ruta Nacional No. 27. Establecer la afectación que presentan tanto los materiales propios de este talud, como el concreto lanzado y el acero de refuerzo producto del DAR, con el fin de verificar si las soluciones implementadas se adecúan a las condiciones geológicas y geotécnicas del lugar.

5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Levantar la topografía en detalle de los taludes del km 38+600 en la RN-27, para determinar datos paramétricos y hacer un análisis geomorfológico del sitio. El levantamiento topográfico se hizo mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT), que incluye el uso de fotografías aéreas obtenidas con este vehículo.
- Hacer una caracterización geomorfológica del sitio del km 38+600, para analizar pendientes, drenajes y líneas de flujo superficiales entre otras características que podrían dar información sobre aspectos de inestabilidad del talud.
- Realizar una caracterización geológica del sitio mediante un muestreo de los materiales de los taludes.
- Realizar una caracterización mineralógica de los materiales del sitio, para determinar elementos típicos de sitios con presencia de DAR.
- Realizar ensayos de pH en pasta para determinar la ocurrencia de drenaje ácido, medir su intensidad y extensión en los taludes seleccionados del km 38+600.
- Caracterizar geológica y geotécnicamente el deslizamiento ocurrido en el kilómetro 38+600 de la RN-27, el domingo 9 de agosto del 2015.
- Determinar y cuantificar la afectación de los materiales (concreto lanzado y acero) que han sido empleados para la protección y estabilización en el sitio donde ocurrió el deslizamiento, mediante pruebas realizadas a muestras recolectadas.
- Valorar cuantitativamente el efecto de la acidez en el deterioro de las soluciones implementadas para la estabilización y protección del talud.

- Analizar los informes presentados por el Concesionario de la ruta, con respecto al efecto del drenaje ácido de roca en los materiales utilizados para la protección y estabilización del talud, así como en la estabilidad de la obra.

6. METODOLOGÍA

A continuación se describe el procedimiento llevado a cabo para la elaboración de este informe, desde el levantamiento topográfico en detalle utilizando los VANT y la selección de los puntos que se muestrearon, los análisis de laboratorio y la interpretación de datos, posteriormente se mencionan los alcances y algunas limitantes que presenta este estudio.

La metodología utilizada en este trabajo consistió en los siguientes pasos:

6.1 Levantamiento topográfico en detalle mediante VANT

El levantamiento topográfico se realizó el día 11 de agosto del presente año. Se utilizaron dos vehículos aéreos no tripulados (VANT) de tipo DJI Phantom III Profesional[®], que cuentan con cámaras DJI FC-300 con resolución de 12 Mega píxeles para el levantamiento de fotografías aéreas georreferenciadas. Se colocaron cuatro puntos de control con GPS (de doble frecuencia) en la zona de estudio para posteriormente realizar la ortorectificación y levantamiento topográfico con el programa Agisoft PhotoScan[®]. La resolución obtenida es de 3 cm por píxel, la altura de vuelo de los VANT fue de 100 m, se generaron un total de 94 imágenes con un traslape superior al 60%. La información generada fue utilizada para determinar los datos paramétricos y geomorfológicos de los taludes estudiados.

6.2 Muestreo y caracterización de materiales para pH en pasta

El muestreo en este sitio fue realizado el día 11 de agosto, estableciendo dos segmentos de trabajo, uno (el principal) al lado izquierdo (LI) de la vía y otro al lado derecho (LD) de la carretera en el sentido San José-Caldera. A lo largo del talud del LI se tomaron 12 muestras del suelo del sitio. Cada muestra fue tomada a una distancia mínima de ~10 m entre una y otra, a lo largo de unos 300 m (ver figura 2).

A cada una de las muestras tomadas, se le realizó una descripción litológica y mineralógica, se determinó el porcentaje de sulfuros de la muestra y la presencia de carbonatos mediante la utilización del HCl al 10 %. Además se tomaron fotografías de cada uno de los puntos en donde se obtuvieron las muestras. Cada una de ellas se rotuló con un código específico y se ubicó dentro del croquis correspondiente.

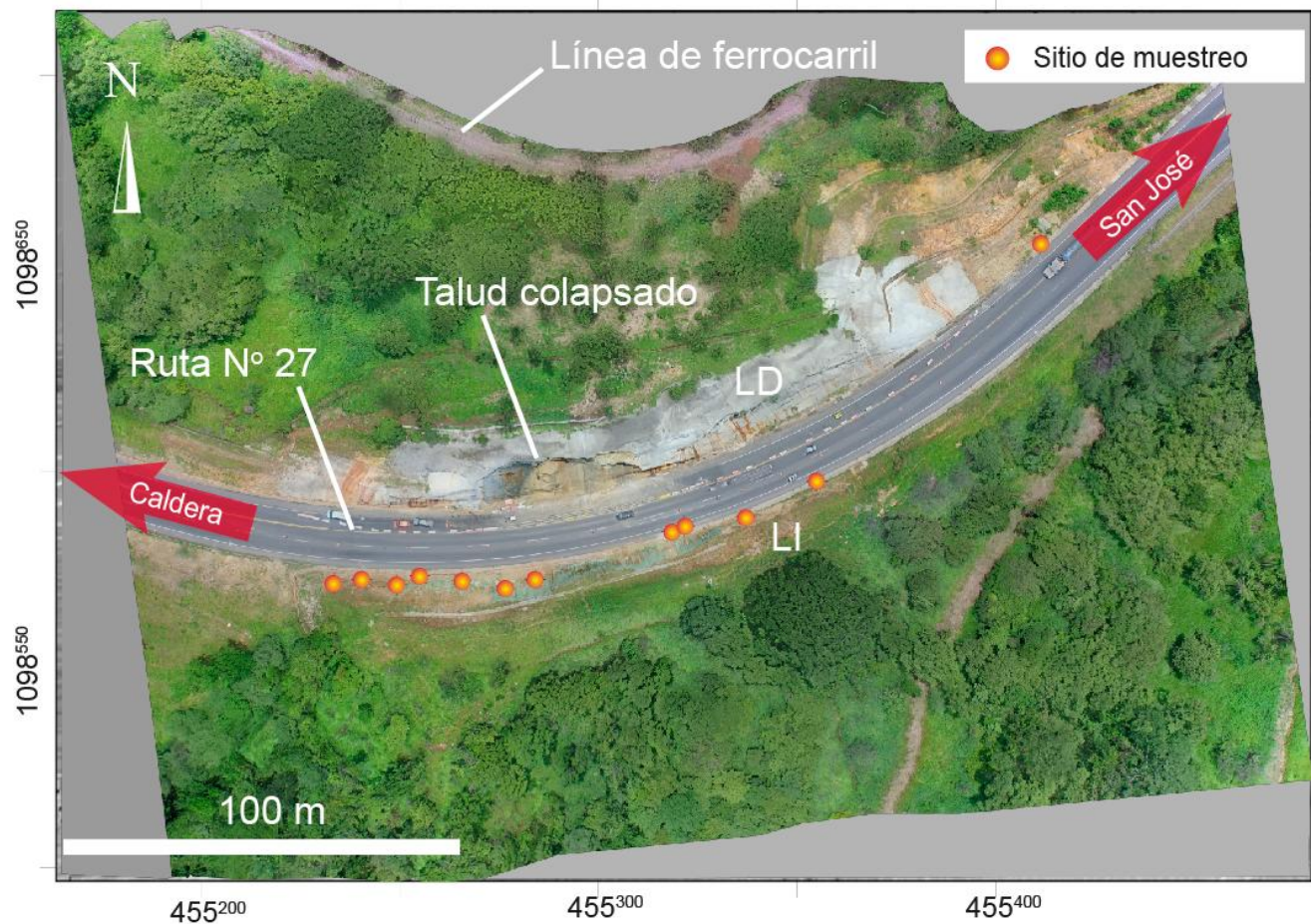


Figura 2. Imagen aérea tomada con VANT donde se muestra el sitio del deslizamiento y la ubicación de cada una de las muestras tomadas para análisis de pH en pasta. LD = Lado derecho, LI = Lado izquierdo el sentido San José - Caldera.

6.3 Mediciones pH en pasta en el laboratorio

La metodología utilizada en este trabajo para medir el pH de los materiales de los taludes, es conocida como pH en pasta. Es una adaptación de técnicas de geología ambiental para determinar la

presencia de drenaje ácido de rocas (DAR) en proyectos mineros (Sobek et al., 1978) y que es derivada de pruebas que se hacen en mediciones agrícolas (USEPA, 1994). Las mediciones de pH se realizan a una pasta generada con los suelos y/o rocas de interés. Los datos obtenidos proporcionan una indicación de la generación neta de ácido asociada con una muestra, ya que el pH es un control fundamental, tanto en los índices de reacción primaria, como en la solubilidad del mineral (MEM-PERÚ, 2015).

Las mediciones de pH de suelos se realizaron en el Laboratorio Geoquímica de la Escuela Centroamericana de Geología (ECG, UCR). Se siguió la metodología propuesta por Sobek et al. (1978). En general, estas mediciones consisten en tomar una cantidad determinada de material fino, luego disgregar o moler el material y tamizar con malla N°10 (apertura 2 mm), y descartar la fracción gruesa. Se toman 20 g del material (Figura 3A) y a cada muestra seca de roca o suelo, se le agrega con ayuda de una probeta 20,0 ± 0,5 ml de agua ultrapura con una resistividad de 18,2 MΩ/cm recién obtenida del purificador y pH neutro (7).

Las muestras se ponen en un agitador con una pastilla magnética por 10 minutos a temperatura ambiente (Figura 3B). Se toman las medidas necesarias para evitar la contaminación cruzada entre las muestras o los patrones. Se introduce el electrodo para hacer la medición. Se espera a que se estabilice la medida (Figura 3C). Este proceso se hizo por triplicado y se tomó el promedio de las tres mediciones de cada muestra analizada.

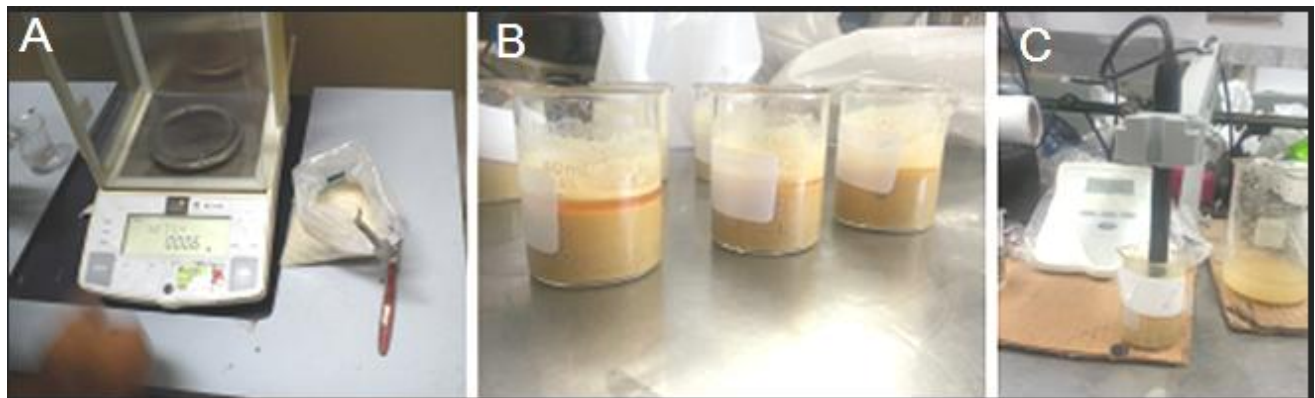


Figura 3. Los análisis de pH en pasta a suelos y rocas de los taludes se realizaron en los laboratorios de geoquímica de la ECG. A) Pesaje de muestras pulverizadas y tamizadas. B) Agua con material pulverizado dejándose reposar. C) Medición de pH de la muestra con pH-metro electrónico.

La metodología empleada para medir y caracterizar la afectación del DAR en las rocas, el concreto y acero del sitio se describen junto con los resultados obtenidos más adelante en este informe.

7. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DEL KM 38+600

7.1 Morfología de taludes

La zona de la RN-27 ubicada en el km 38+600 corresponde con una sección de corte en cajón, con taludes a ambos de la carretera, a continuación se describen las principales características geomorfológicas de estos taludes.

El talud LD (Figura 4), antes del deslizamiento contaba con un muro anclado y drenajes incrustados en la roca meteorizada para dar soporte contra deslizamientos y generar estabilización. Es un talud de corte, presenta una sección de aproximadamente 190 m de longitud con concreto lanzado y otra sección de menor longitud sin protección superficial, esta última sección cuenta con al menos tres áreas separadas por cunetas y contra cunetas.

La altura máxima de este talud es de unos 35 m frente a la carretera, sin embargo en la parte posterior cerca de la línea del ferrocarril la altitud es mayor (48 m sobre la carretera). Las pendientes de las zonas que están cubiertas con concreto lanzado oscilan entre 35° y 90° (ver figura 5). En el sector de las terrazas las pendientes son cercanas a los 35° y solamente en la parte superior las pendientes son entre 8° - 35°, posiblemente este sector aun preserva la pendiente original de la zona.

Por la dirección de las pendientes y los cambios de altitud de hasta 50 m, es muy probable que las líneas de flujo del agua dentro del macizo tengan dirección de norte a sur, por lo tanto, los fluidos tratan de buscar salida en el frente del talud cubierto por el concreto lanzado.

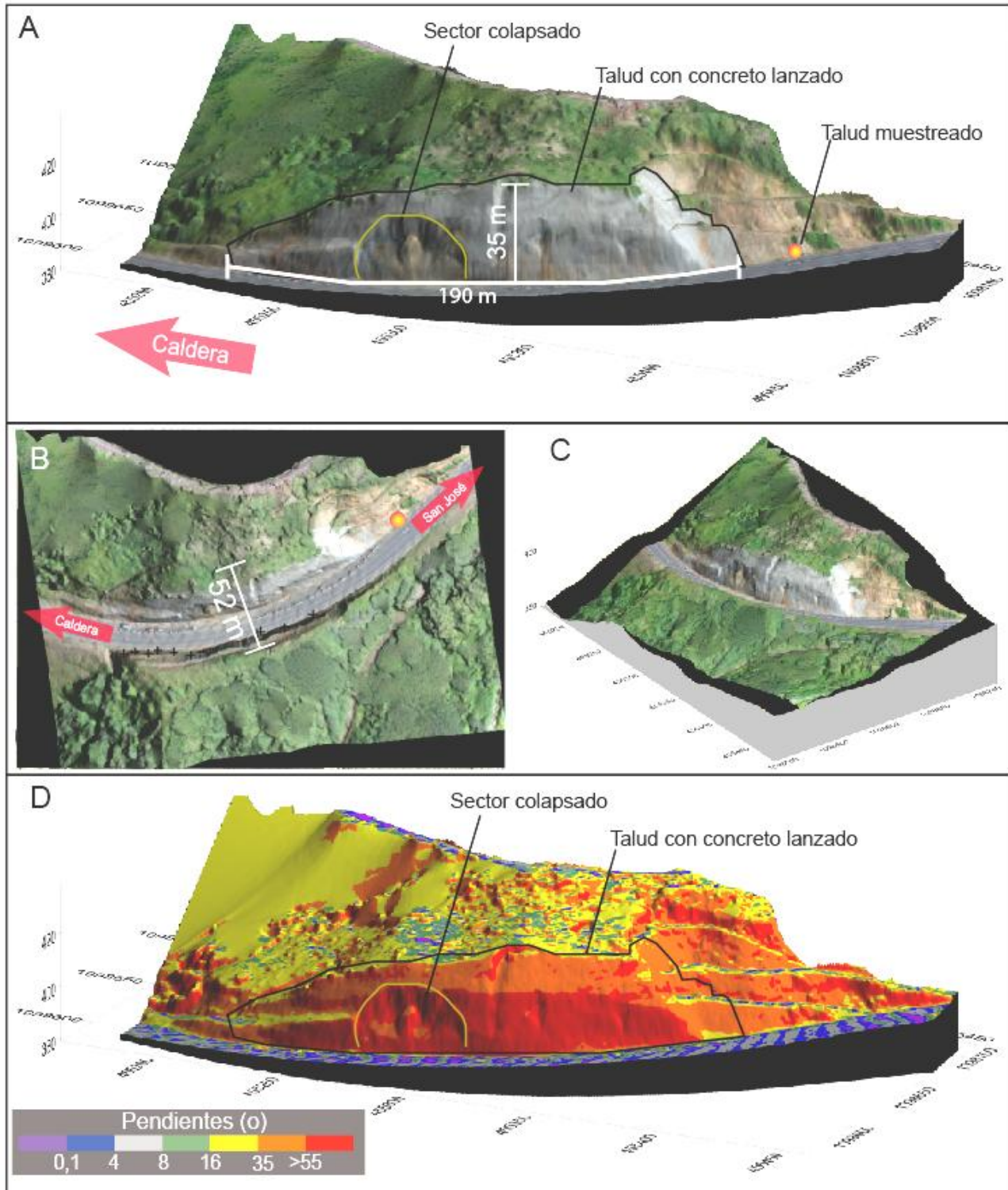
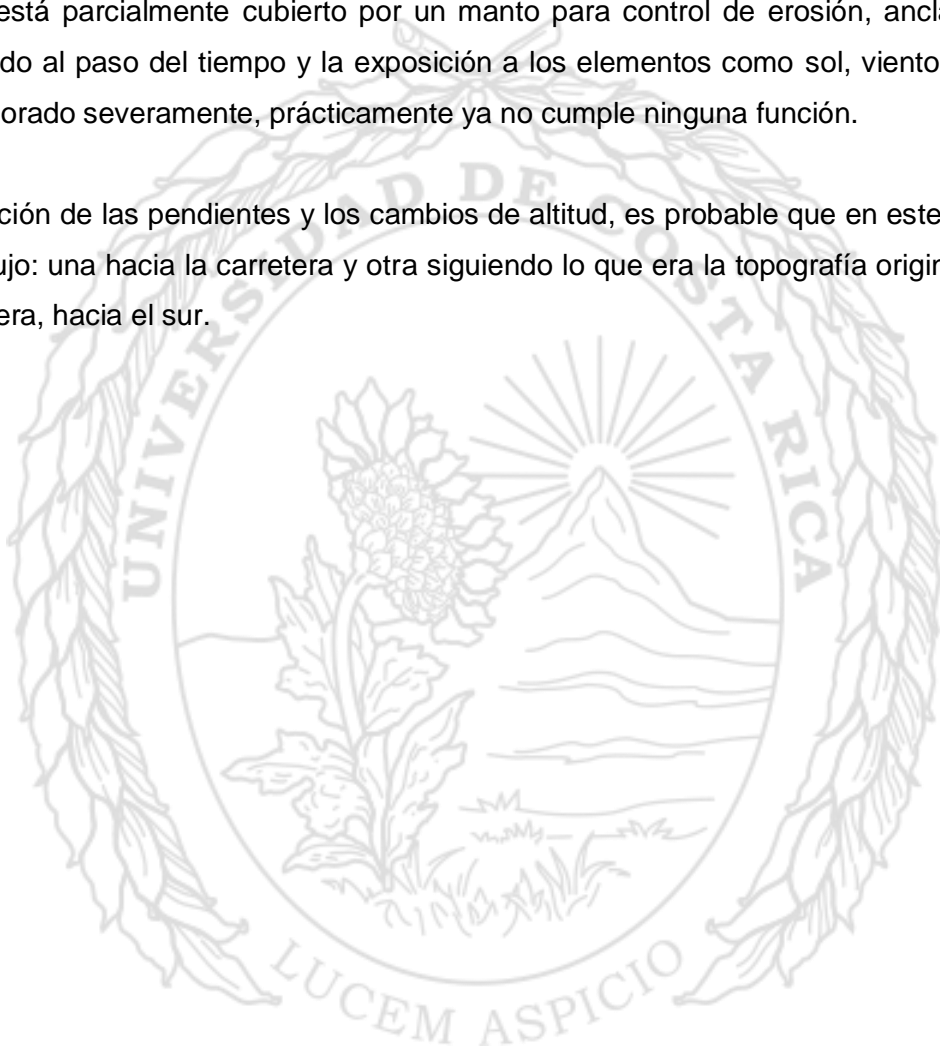


Figura 4. Vista del talud del lado derecho. A) Se muestra la sección colapsada. B) Distancia que hay entre las zonas más elevadas de los taludes. C) Vista lateral oblicua del talud LD. D) Pendientes del talud LD. Figuras generadas a partir de datos topográficos levantados con el VANT.

El talud del lado izquierdo (LI), también es un talud de corte (Figura 5), presenta una longitud de aproximadamente 220 m y una altura máxima de 15 m. Tiene dos bermas en la parte superior con contra cunetas. Las pendientes en toda la sección son superiores a 35° y en algunos puntos puede llegar a ser superior a 55° .

Este talud está parcialmente cubierto por un manto para control de erosión, anclado con pines de acero. Debido al paso del tiempo y la exposición a los elementos como sol, viento y lluvia, el manto se ha deteriorado severamente, prácticamente ya no cumple ninguna función.

Por la dirección de las pendientes y los cambios de altitud, es probable que en este talud existan dos líneas de flujo: una hacia la carretera y otra siguiendo lo que era la topografía original antes del corte de la carretera, hacia el sur.



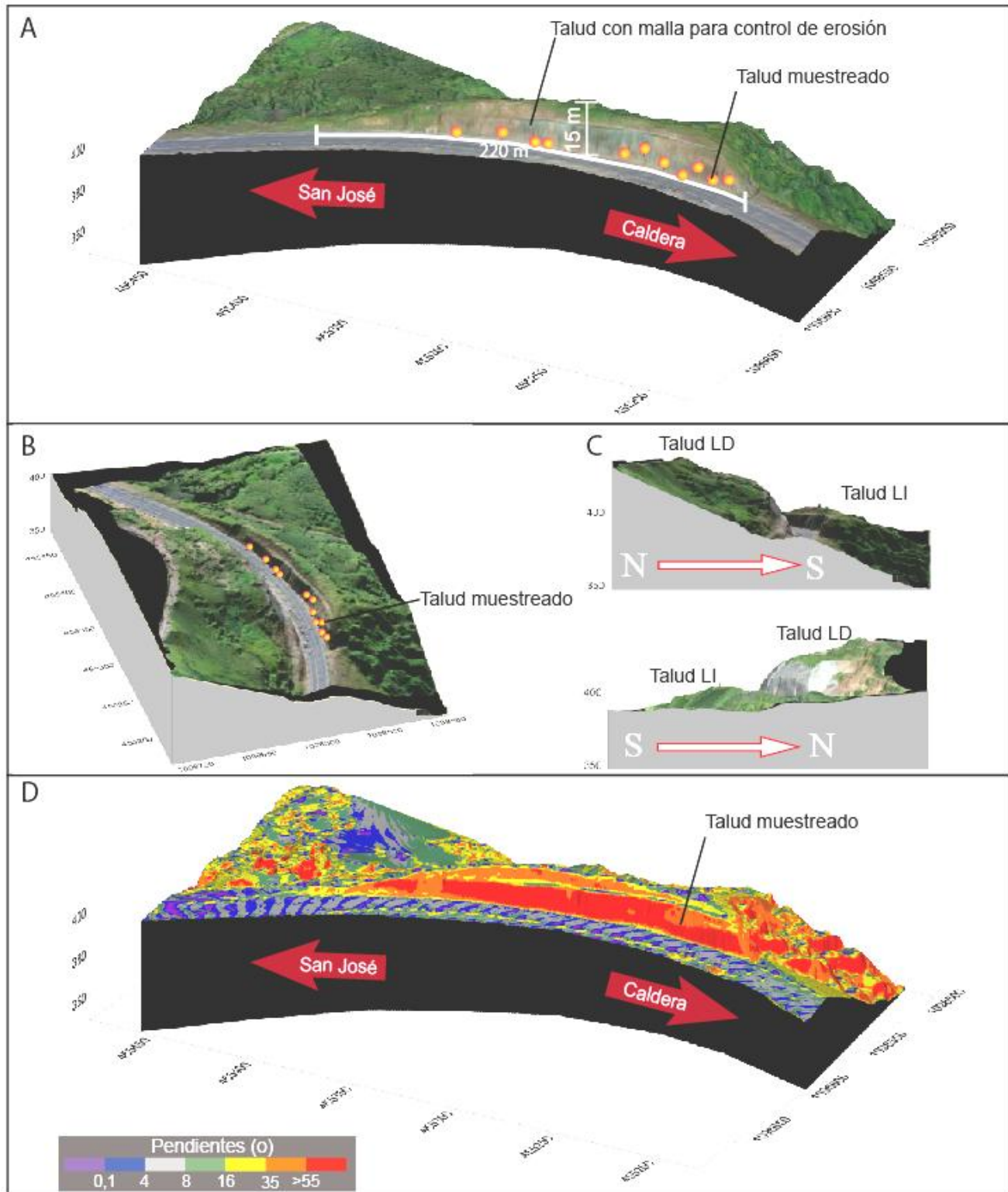


Figura 5. Información referente al talud del lado izquierdo. A) Ubicación de muestras para pH en pasta, largo y alto del talud. B) Vista lateral oblicua. C) Vistas de Perfil y D) Pendientes de talud.

7.2 Geología y petrografía

Las rocas localizadas en el estacionamiento 38+600, corresponden con materiales de la Formación Grifo Alto (Porrás *et al*, 2012 & Ruiz *et al*, 2015). En general, en varios sitios de la RN-27 las rocas asociadas con esta formación son: coladas de lavas masivas, brechas volcánicas, diques y otras facies del mismo origen, afectadas por fallas tectónicas, fracturas, alteración hidrotermal y como se demostró en trabajos anteriores (LM-PI-UGERVN-003-2015, enero 2015) y se vuelve a evidenciar aquí, presencia de drenaje ácido de roca.

En el sitio de estudio afloran brechas volcánicas monolíticas, con poca presencia de sulfuros como piritita, pero gran cantidad arcillas ricas en azufre. También son frecuentes la presencia de sulfatos y cristales milimétricos de yeso.

Las plagioclasas alteradas de los bloques angulares y redondeados de la brecha no reaccionan al HCl, algunos de estos bloques presentan leve magnetismo lo que indica la presencia de magnetita en su mineralogía.

La parte inferior de los taludes LD y LI están silicificadas y parecen ser más estables, sin embargo, en la parte media y superior, la brecha volcánica no se encuentra silicificada y presenta una matriz muy alterada con tonalidades rojizas y moradas, típicas de una zona afectada por alteración hidrotermal, es en esta zona intermedia donde se han dado los problemas de caída de concreto, suelo y rocas (Figura 6).

En el sitio, hay un fuerte olor azufre que proviene de las arcillas de la matriz de la brecha. Hay partes de los taludes (especialmente en los bordes externos) con rocas afectadas por los procesos normales de meteorización en una zona tropical, con diferentes grados del alteración, que van desde poca alteración, hasta la degradación casi completa de los minerales originales constituyentes de las rocas.

En la zona central donde se observa la presencia de alteración hidrotermal, las rocas presentan arcillitización y silicificación, tornándose más duras y resistentes a la meteorización y erosión. Sin embargo solo ocurre en la parte inferior de los taludes. Predominan los sitios con gran degradación

de los materiales rocosos originales del talud, especialmente en el talud izquierdo del km 38+600 (Sentido San José – Caldera).



Figura 6. Se muestran los materiales que afloran en los taludes LD y LI del km 38+600. A) En la parte inferior las rocas y la matriz se encuentran silicificadas y hay partes que aun están cubiertas por el concreto lanzado. B), C) y D) La sección media y superior corresponde con una brecha donde los bloques están en una matriz arcillosa rica en azufre, sulfatos y cristales de yeso y no está silicificada.

7.3 Determinación del proceso de drenaje ácido de roca

A continuación se presentan las observaciones, mediciones y análisis de diferentes aspectos que evidencian la presencia de DAR en el km 38+600.

7.3.1 Aspectos Mineralógicos

Según observaciones realizadas en el campo y otras posteriores en el laboratorio, se determinó que la alteración de los materiales originales en el sitio se presenta en forma de dos tipos de sulfatos que son comunes en zonas donde existe DAR. Se trata de la Jarosita y la Schwertmannita. Además, se identificaron cristales de yeso (sulfatos de calcio hidratado), que también son típicos en este tipo de ambientes ácidos (Figura 7).

La Jarosita, es uno de los minerales que origina "Yellow Boy", uno de los aspectos más comunes en sitios con DAR (ver figura 7), se trata de un sulfato de potasio de hierro hidratado básico, que se forma por la oxidación de sulfuros de hierro y que está presente en los taludes del km 38+600.

La schwertmannita es un hidroxilado e hidratado de hierro, con aniones adicionales de óxido. Es un mineral de aparición secundaria que se forma por precipitación en zonas pH muy ácido y alto contenido en iones de sulfato de hierro.

La ausencia de sulfuros (pirita) en este sitio y la presencia de sulfatos y cristales milimétricos de yeso indican que la evolución del DAR en este sitio es más avanzada que otros puntos donde se ha identificado este proceso, como por ejemplo el km 48+000.

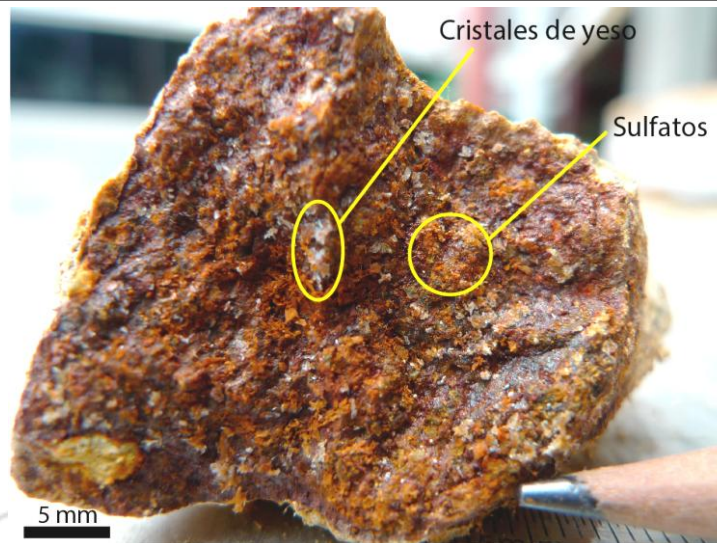


Figura 7. Minerales de yeso y sulfatos presentes en rocas del talud del km 38+600, reconocidos como jarosita y schwertmannita. Estos minerales son típicos en ambientes donde se está dando DAR.

7.3.2 Resultados de mediciones de pH del agua superficial del sitio

En el informe de LanammeUCR (LM-PI-UGERVN-003-2015, enero 2015), se presentaron datos de mediciones del pH de las aguas que salen de los drenajes en diferentes taludes de la RN-27. Entre ellos se mencionan las mediciones y resultados *in situ* del agua que salía al pie del talud en el km 38+600. En ese sitio, las mediciones de acidez de aguas superficiales que fluyen en la parte inferior y que salen por las fracturas inferiores del concreto lanzado en su contacto con las cunetas dieron como resultado un pH = 5,5 (similar a la lluvia ácida). La conductividad eléctrica medida en las aguas de este sitio dio valores que indican que existen altas concentraciones de iones disueltos provenientes de minerales.

El pH de 5,5 medido en el agua es relativamente bajo (mayor acidez) y tiene suficiente concentración para alterar el concreto, al reaccionar con su componente calcáreo, además, la disolución de iones indica que se están disolviendo minerales en el flujo de agua. La disolución de iones se atribuye las reacciones del ácido sulfúrico generado principalmente por la oxidación de sulfatos y en menor grado por los sulfuros identificados en este sitio.

La coloración de estas aguas es levemente amarillenta y con un fuerte olor fuerte a azufre. Por los sulfatos y óxidos de hierro que van disueltos en el agua, las cunetas se tiñen con coloraciones rojizas, naranjas y amarillentas (Figura 8).

La acidez del agua genera una reacción con el componente calcáreo del concreto de las cunetas degradándolas en la superficie, si se encuentran fracturas la degradación se puede profundizar, los efectos mencionados anteriormente se pueden observar en la figura 8.

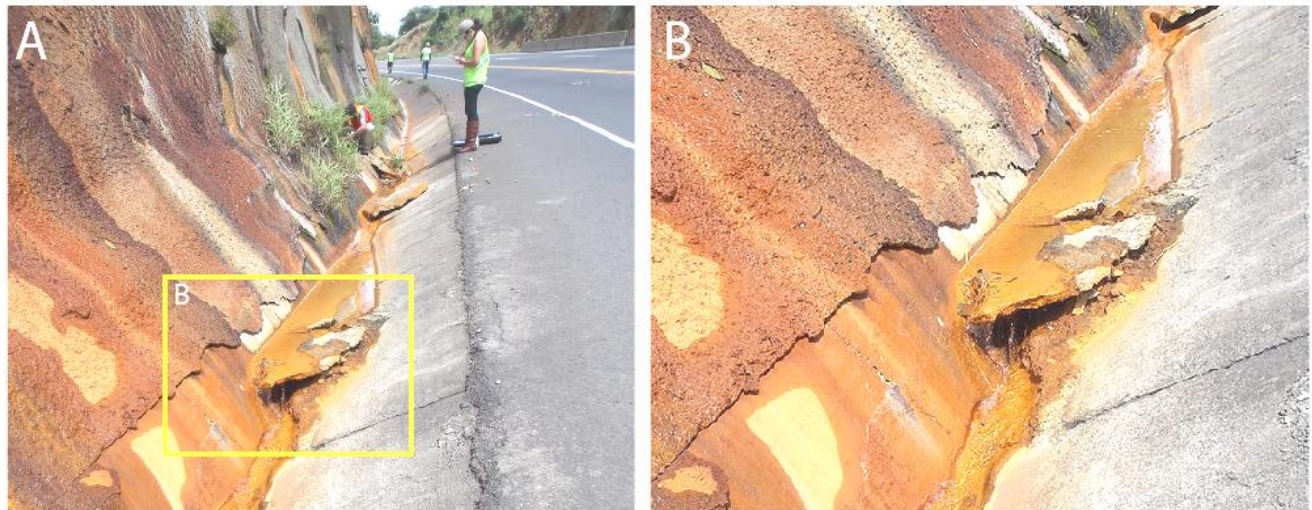


Figura 8. A) Muestreo geoquímico de aguas superficiales realizado el 27 de octubre del 2014 al pie del talud en km 38+600, los resultados obtenidos fueron de 5,5 muy similar a la lluvia ácida. B) Detalle del efecto del agua ácida en las cunetas y concreto lanzado al pie del talud.

7.3.3 Resultados de las mediciones de pH en pasta

Los resultados del muestreo realizado en este sitio provienen de 12 muestras de suelo recolectadas a lo largo del talud del lado izquierdo y algunas del lado derecho.

Estas muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Geoquímica de la Escuela Centroamericana de Geología con la metodología descrita en la sección 6.3. Los datos obtenidos, se resumen en el cuadro 1 y se muestran en la figura 9.

De las 12 muestras analizadas, diez de ellas presentaron valores de pH inferiores a 3,0. Las dos muestras restantes (#1 y #11) presentan valores de pH de 4,20 y 6,04 respectivamente, estas dos muestras se ubican en los extremos del talud del lado izquierdo en el sentido San José - Caldera por lo que se puede explicar sus valores más altos y por lo tanto menos ácidos debido a que están saliendo de la zona de influencia donde ocurre DAR y menos expuestas a la acción del agua, dado que el área que drena hacia el lado izquierdo del talud es muy pequeña.

El valor más bajo de pH que se registró en este sitio fue de 2,30 y el valor promedio de todas las muestras analizadas es de 2,92.

Estos resultados reflejan una evidencia cuantitativa de que los materiales rocosos y arcillosos que se presentan en los taludes del km 38+600 están generando drenaje ácido de roca.

Cuadro 1. Resultados de muestras analizadas en Agosto 2015, taludes en el estacionamiento del km 38+600 de la Ruta Nacional No. 27

Muestras analizadas	12
Temperatura promedio del agua durante mediciones	25,2° C
Valor más alto de pH	6,04
Valor más bajo de pH	2,30
Valor promedio	2,92

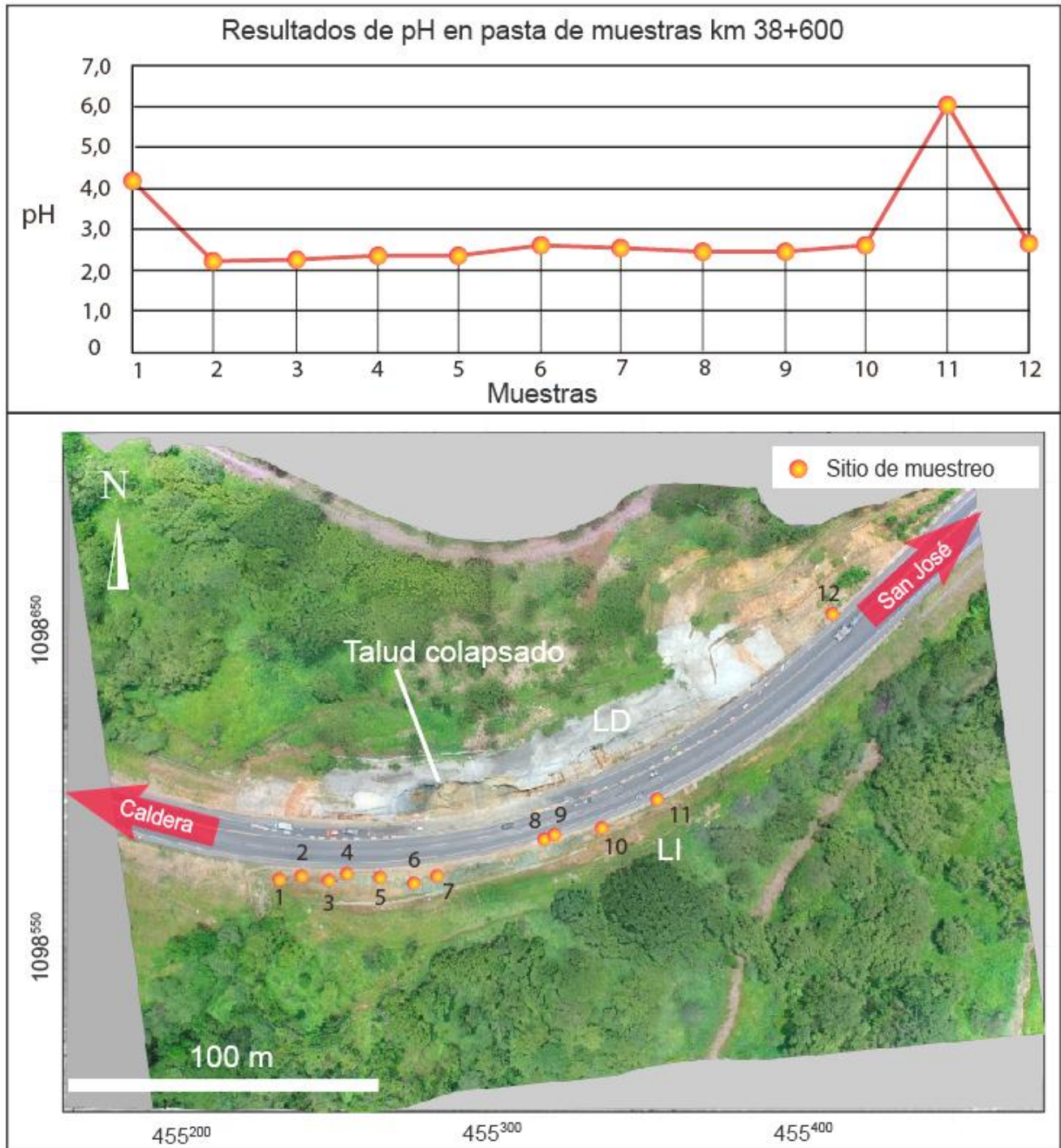


Figura 9. Resultados de pH en pasta realizados a los suelos ubicados en los taludes del estacionamiento 38+600. Como se observa, todas las muestras presentan valores de pH inferiores a 6,4. Las dos muestras con los valores más altos están en los bordes del talud del lado izquierdo de la ruta. El resto de las muestras presenta valores entre 2,70 y 2,28 lo que indica la alta acidez que están generando estos materiales.

7.3.4 Conclusión sobre presencia de DAR en el Km 38+600

Con base en las observaciones e identificación mineralógica de los materiales del sitio, los análisis de pH del agua superficial del 2014, los resultados de la conductividad eléctrica del agua superficial y los resultados de los análisis de pH en pasta que se realizaron a las muestras del sitio para este informe, se concluye que en los taludes del km 38+600 se está generando Drenaje Ácido de Rocas.

En el cuadro 2 se resumen los principales parámetros y resultados analizados que indican la presencia de DAR en este sitio.

Cuadro 2. Resumen de resultados que indican la presencia de DAR en los taludes del estacionamiento km 38+600 de la Ruta Nacional No. 27

Parámetro analizado	Resultados
Mineralogía	- Presencia de sulfatos + (Yellow Boy) y sulfuros (-) - Presencia de cristales de yeso - Presencia de patinas de óxidos de hierro - Presencia de azufre pastoso en las arcillas
pH del agua superficial	- Resultados de 10/2014 indica pH = 5,5
Conductividad de agua superficial	- Resultados de 10/2014 indican iones disueltos
pH en pasta de los materiales del talud	- Valor promedio de pH = 2,92

7.4 Descripción del deslizamiento del talud del km 38+600

El talud del lado derecho del km 38+600, presentó un deslizamiento el día 9 de agosto del presente año en horas de la tarde, generando el cierre de la Ruta Nacional 27 por varias horas, posteriormente se permitió el paso regulado con el cierre de un carril. El cierre de un carril continúa hasta la fecha de elaboración de este informe (noviembre 2015).

El deslizamiento ocurrió en una zona del talud que es escarpada, la cual se encontraba cubierta por el concreto lanzado. En el sitio el agua superficial es manejada mediante contra cunetas y cunetas a nivel de la carretera, también se han instalado subdrenajes para la evacuación del agua infiltrada en el talud.

En informes anteriores (LM-PI-UGERVN-003-2015, enero 2015) se había mencionado la colmatación de varios de los drenajes sub horizontales instalados en el talud, así como la salida de agua ácida en el pie de la zona cubierta por el concreto lanzado.

El deslizamiento del 9 de agosto presentó una falla de forma cóncava, ocurrió en un talud de corte, donde la diferencia de altitud entre la base y la corona del deslizamiento es de aproximadamente 17 m. Presenta una longitud de 42,5 m y pendientes superiores a los 55°, aunque en la parte superior donde colapsó el concreto la pendiente llega a ser subvertical. La condición de humedad del talud el día de la inspección (11 de agosto del 2015) era de húmedo a saturado, con flujo moderado de agua en el pie del talud y la corona.

En el sector izquierdo del área deslizada se había colocado un manto para control de erosión con refuerzo de malla metálica, junto con anclajes de acero que penetran una determinada longitud dentro del talud. Un sector aledaño al manto colocado estaba expuesto, sin concreto, ya que fue intervenido y el concreto en ese sector había sido removido, el resto del área que falló, estaba cubierta con concreto lanzado y anclajes de acero. El material que cayó en la vía fue una parte del concreto lanzado, así como la roca y el suelo alterados hidrotermalmente, con presencia de azufre, el cual favorece la generación de drenaje ácido de roca al reaccionar con el agua.

Se observaron grietas en las secciones del talud que aún están cubiertas por el concreto lanzado. El tipo de falla en el suelo presenta un patrón compuesto entre rotacional y traslacional, aunque algo del material pudo caer por volcamiento. La superficie del deslizamiento es de suelo-roca, ya que como se describió en la sección 7.1 se trata de una brecha volcánica muy alterada.

Con base en el levantamiento de la superficie realizado con el VANT que se presenta en la figura 10, el volumen de masa deslizado se estimó en aproximadamente 1140 m³. Según la clasificación del volumen de la masa deslizada, establecida en la Plantilla de Inspección de Talud del Código

Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica, el volumen removido se clasifica como *Muy Pequeño*. Su velocidad debió ser extremadamente rápido > 5 m/s.

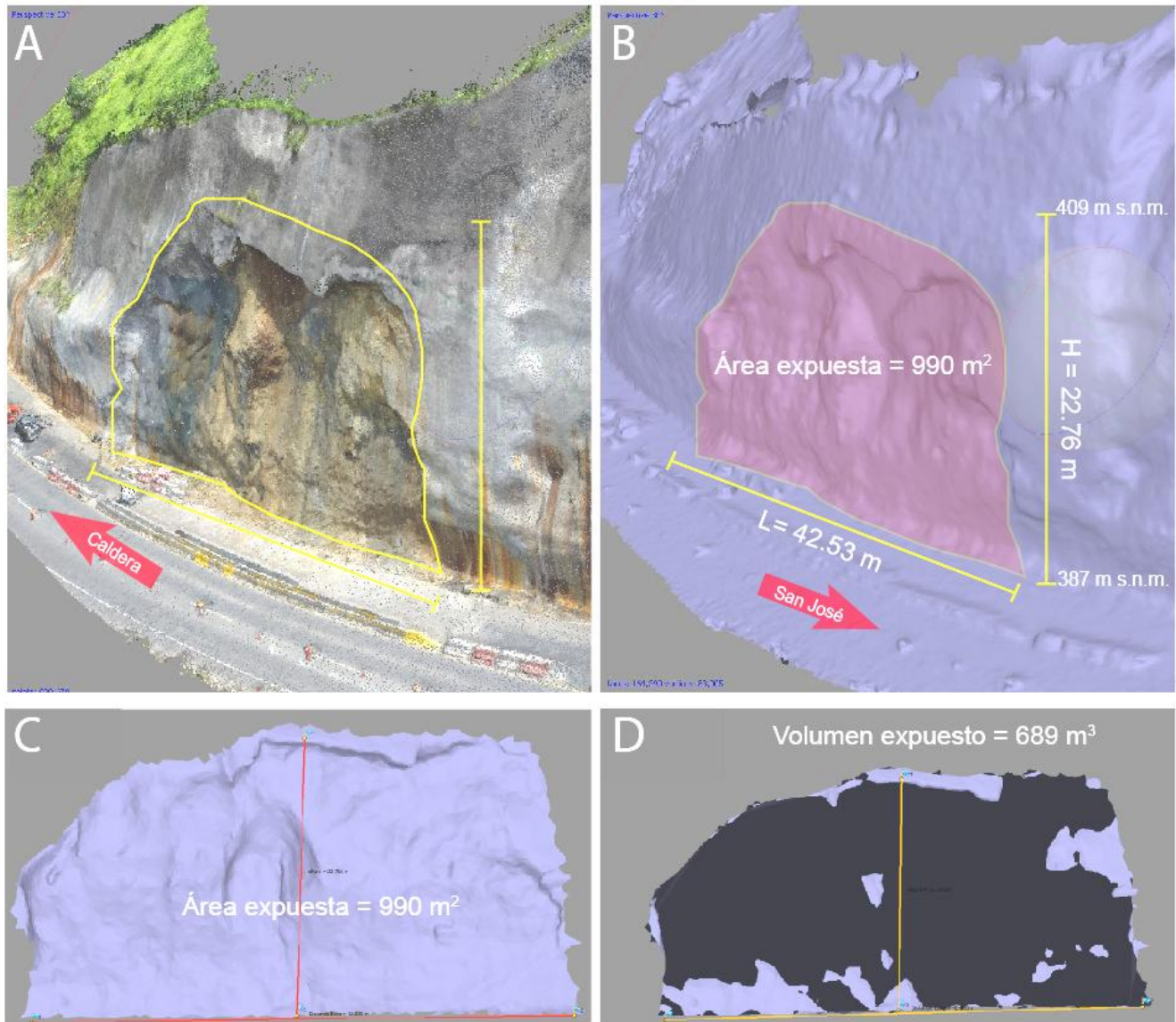


Figura 10. Datos paramétricos del deslizamiento en el talud lado derecho sentido San José – Caldera, en el km 38+600. A) Modelo de elevación digital con fotografía aérea sobrepuesta. B) Modelo de elevación digital. C) Área expuesta y D) Volumen estimado de material deslizado.

El disparo de este evento puede atribuirse a la lluvia intensa de la tarde del día 9 de agosto (IMN, 2015). Condiciones geológicas y geotécnicas como la pendiente, las propiedades y la alteración del suelo y la roca, así como la afectación que presenta el concreto lanzado por el efecto del DAR (analizada más adelante), se combinaron con el evento de disparo para generar la caída de material en la carretera.

El nivel de riesgo en este sitio es alto considerando la gran cantidad de vehículos (TPD >24 000 vehículos) que transita la ruta, la geometría del talud, la cercanía con la carretera y la deteriorada condición del concreto, el suelo y la roca del lugar.

7.5 Efecto del DAR en el deterioro del concreto lanzado en el talud del km 38+600

En el talud del lado derecho del km 38+600 se observan varios sectores en los cuales el concreto que fue colocado como parte del sistema de protección y estabilización ha experimentado una serie de deterioros. En esta sección se describen en detalle estos deterioros y se explica la influencia del DAR en la generación de estos problemas.

7.5.1 Condición del concreto lanzado

En el concreto lanzado del km 38+600 se observó agrietamiento tanto en dirección vertical como horizontal, con grietas de ancho superior a 0,3 mm que pueden alcanzar varios centímetros de separación, y con una profundidad igual al espesor de la pantalla de concreto (ver figuras 11 y 12).

Se observaron eyecciones de eflorescencia y manchas color naranja en algunos sectores de la protección de concreto (ver figuras 12 y 13). Además se observó crecimiento de vegetación en varios sectores (ver figuras 11 y 13), lo que indica que las grietas atraviesan por completo el espesor de concreto



Figura 11. Agrietamiento (resaltado con rojo) y crecimiento de vegetación, talud LD, km 38+600.

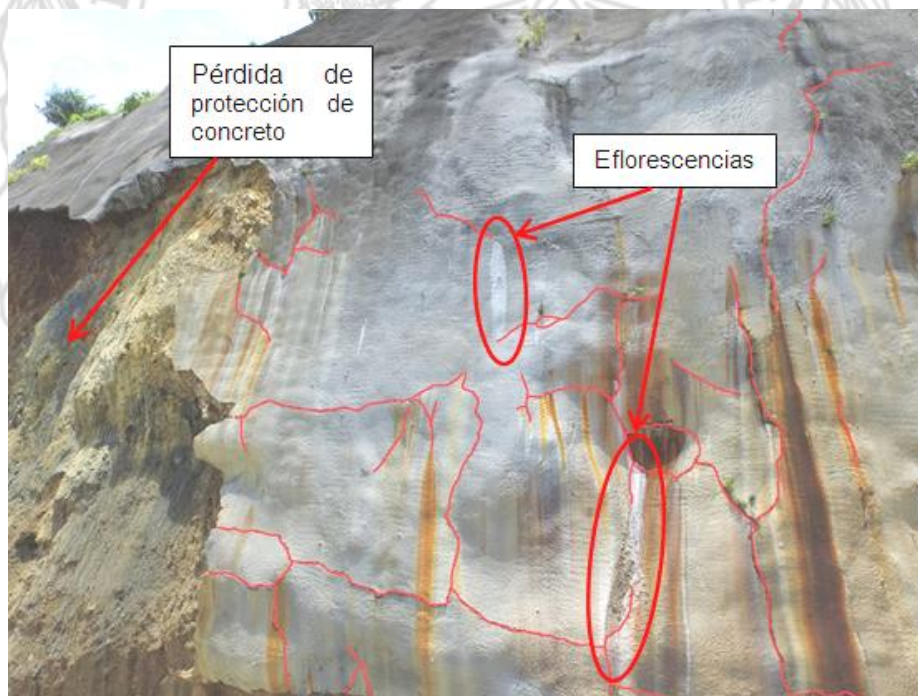


Figura 12. Sector del talud contiguo al deslizamiento, nótese el agrietamiento intenso (resaltado en rojo) y la presencia de eflorescencias.



Figura 13. Vegetación y eflorescencias observadas en el talud del km 38+600.

La investigación realizada incluyó el traslado al LanammeUCR de muestras del concreto del talud del km 38+600, obtenidas el día 10 de setiembre del 2015.

Las muestras se obtuvieron del material que estaba siendo removido por los trabajadores destacados en el lugar. En la siguiente figura se muestra la zona de la cual fueron obtenidas las muestras.



Figura 14. Sitio de donde fueron obtenidas las muestras de concreto lanzado con malla electrosoldada, las cuales fueron objeto de descripciones y análisis para valorar su afectación por DAR.

Las muestras obtenidas son bloques del concreto lanzado que fue colocado en el talud, los cuales contienen malla electrosoldada y pines de varilla de acero, empleados para el anclaje de la malla previo a la colocación del concreto.

El análisis realizado incluye la descripción de alteraciones en la condición del concreto, tanto en su superficie como en su interior, espesores, cambios de coloración, deterioros en el acero de refuerzo, variación de la sección de acero y una prueba para determinar la intensidad de la reacción del concreto al entrar en contacto con el ácido clorhídrico (HCl).

En las siguientes figuras (15 a 19) se presentan fotografías de las muestras de concreto analizadas en el laboratorio junto con sus datos de longitud, ancho y espesores.

Muestra	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Espesores medidos (mm)					Promedio
			1	2	3	4	5	
1	182,03	112,14	51,86	65,80	75,16	65,18	62,23	64,05



Figura 15. Muestra 1. A) Superficie externa. B) Superficie en contacto con el talud. C) Sección transversal.

Muestra	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Espesores medidos (mm)					Promedio
			1	2	3	4	5	
2	307,12	142,83	102,15	133,4	142,02	100,84	136,82	123,05



Figura 16. Muestra 2. A) Superficie externa. B) Superficie en contacto con el talud. C) Sección transversal.

Muestra	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Espesores medidos (mm)					Promedio
			1	2	3	4	5	
3	345,17	393,10	71,90	57,75	57,72	91,21	56,10	66,94



Figura 17. Muestra 3. A) Superficie externa. B) Superficie en contacto con el talud. C) Sección transversal.

Muestra	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Espesores medidos (mm)					Promedio
			1	2	3	4	5	
4	393,00	311,09	79,98	74,57	66,64	70,83	82,40	74,88



Figura 18. Muestra 4. A) Superficie externa. B) Superficie en contacto con el talud. C) Sección transversal.

En la muestra 4 de la figura anterior se observa el corte realizado en el LanammeUCR con equipo mecánico, con el objetivo de observar la condición del concreto en su parte interna.

Muestra	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Espesores medidos (mm)					Promedio
			1	2	3	4	5	
5	248,65	393,72	120,87	103,40	97,23	94,41	128,09	108,81



Figura 19. Muestra 5. A) Superficie externa. B) Superficie en contacto con el talud. C) Sección transversal.

Como se puede observar en las figuras anteriores, varias de las muestras del concreto lanzado tienen en promedio un espesor de aproximadamente 70 mm. El espesor promedio general de las muestras analizadas es de 87,5 mm. Este espesor deja muy poco margen para lograr un recubrimiento efectivo del acero de refuerzo.

En las muestras llevadas al laboratorio se observaron diferentes grados de degradación de la matriz cementante del concreto y pérdida de agregados finos, en la mayoría de los casos sin degradación aparente del agregado grueso, tal como se muestra en las figuras 20 a la 25.



Figura 20. Pérdida de la matriz cementante en el concreto (zona enmarcada en rojo).

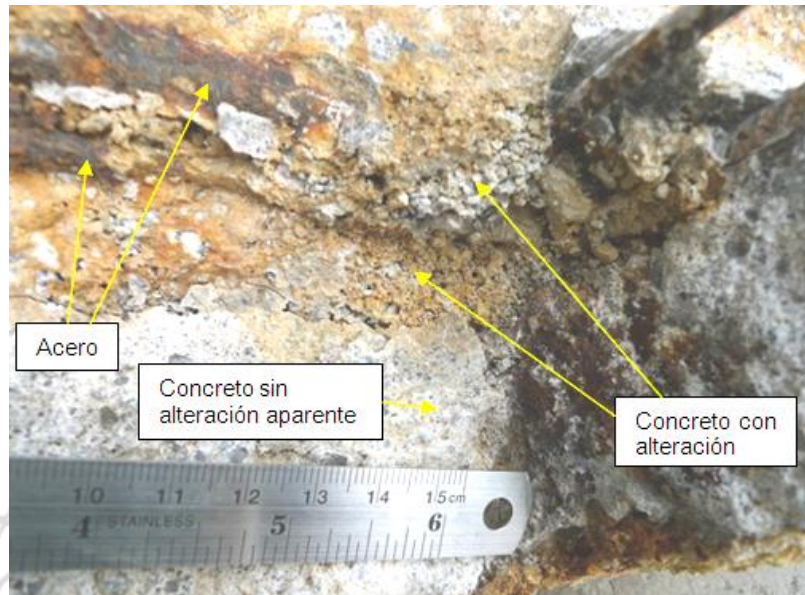


Figura 21. Pérdida de la matriz cementante en el concreto alrededor del refuerzo de acero.

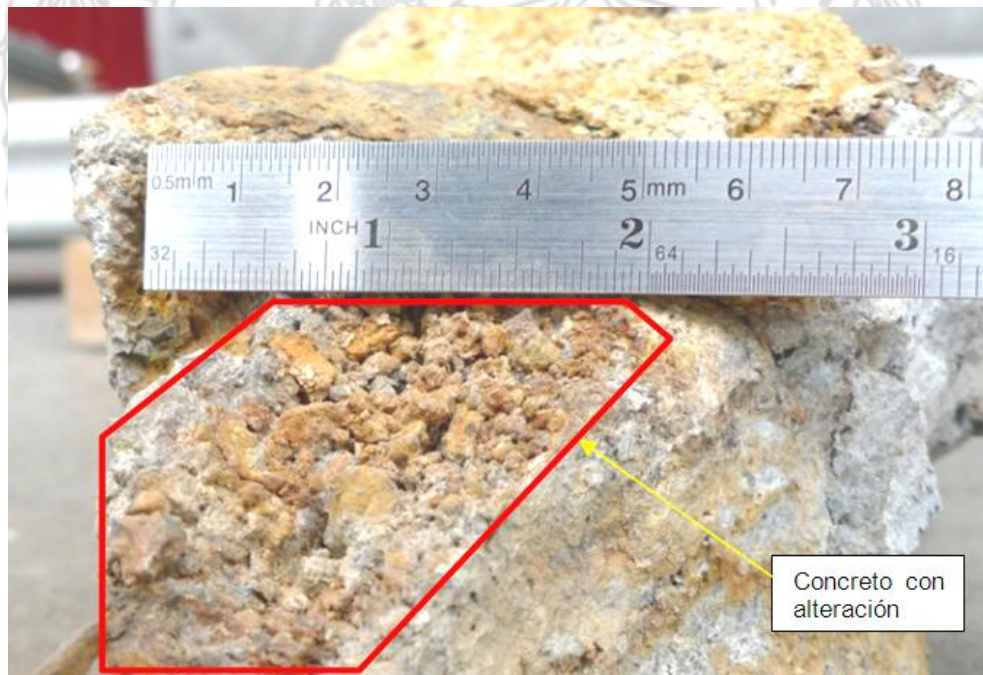


Figura 22. Pérdida de la matriz cementante (zona enmarcada en rojo) en el concreto del km 38+600.

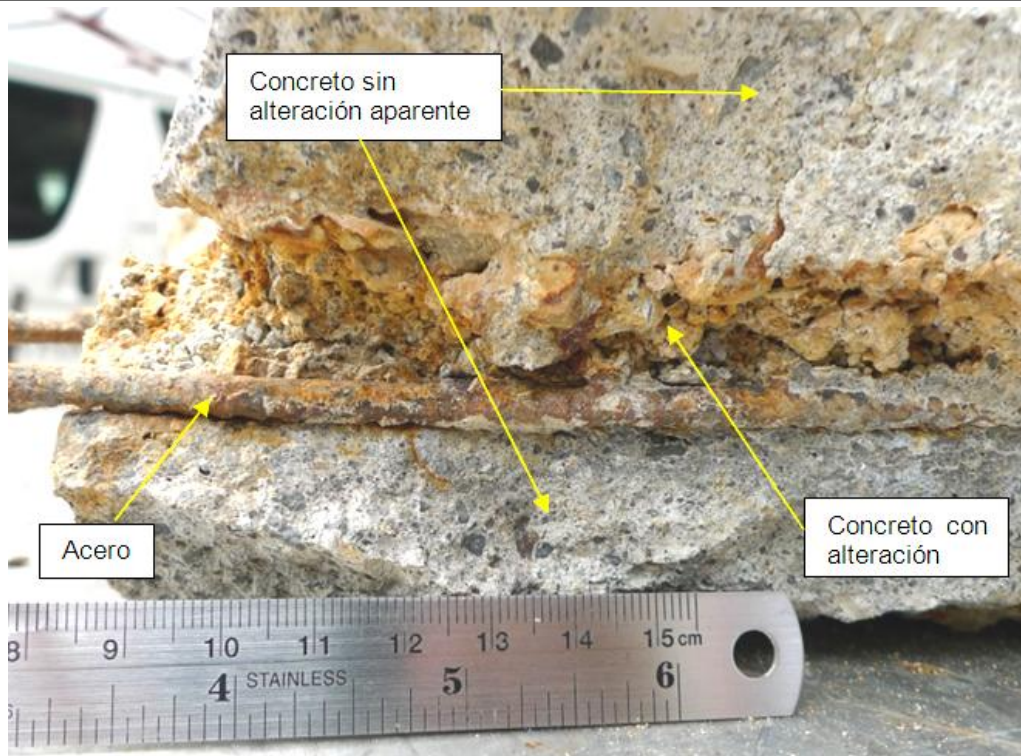


Figura 23. Muestra de concreto con pérdida de la matriz cementante en la zona del refuerzo de acero.

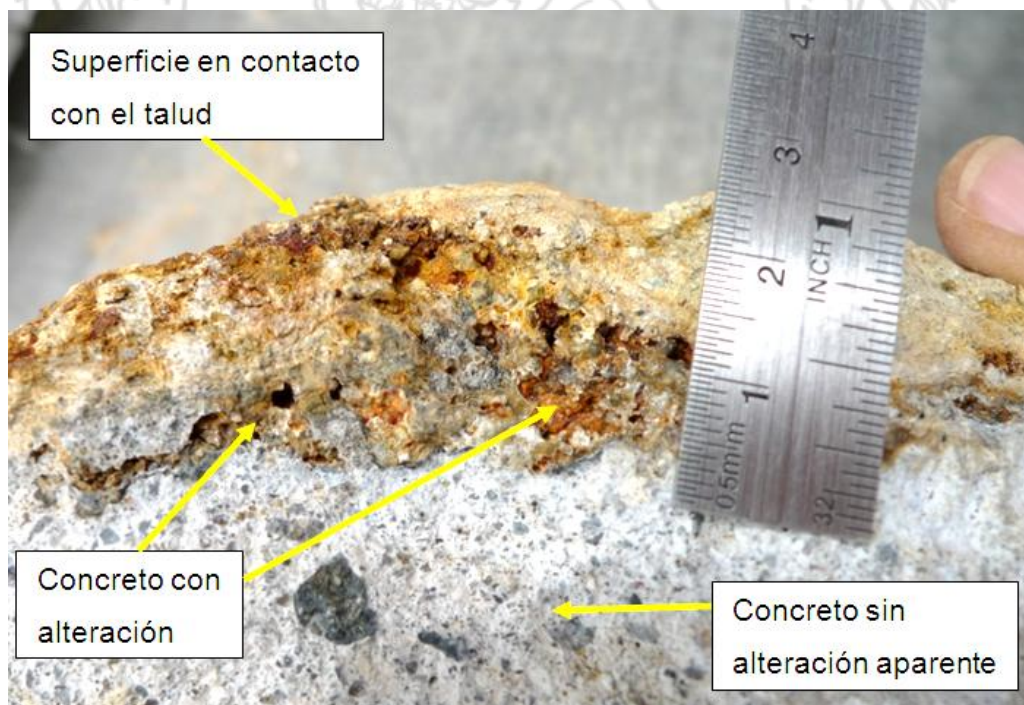


Figura 24. Detalle del deterioro del concreto en la superficie que estuvo en contacto con el drenaje ácido del talud. En este caso la zona de alteración varía entre 1,0 – 1,5 cm aproximadamente.



Figura 25. Deterioro en la superficie del concreto que estuvo en contacto con el drenaje ácido, la superficie fue lavada para remover los restos de suelo. Se observa la pérdida de matriz cementante y de agregado fino.

Los daños observados disminuyen la durabilidad y la integridad del concreto, reduciendo la protección del talud contra los efectos de la lluvia y las aguas pluviales de escorrentía, así como la vida útil de la obra.

Los deterioros encontrados en el concreto que estuvo expuesto al medio ácido también han sido documentados en otros sitios a nivel mundial. En esos casos la afectación se ha dado también en las obras construidas con concreto en caminos y carreteras.

En el cuadro 3 se presenta un resumen de varios de los casos registrados, se indican los problemas generados y el mineral que origina el DAR en ese lugar.

Cuadro 3. Referencias de casos donde el DAR ha sido identificado y ha generado afectación en el concreto, ecosistemas, acuíferos y reservas de agua.

Ubicación	Rocas y minerales que originan el DAR	Problemas relacionados con DAR	Referencias
Pirineos Centrales, España	Po y Py generado en esquistos	Degradación de concreto por formación de sulfatos expansivos en el agregado	Ayora et al., 1998
Barcelona, España	Po y Py generados en lutitas y calizas	Degradación de concreto por formación de sulfatos expansivos en el agregado	Chinchon et al., 1995
Cardiff, Reino Unido	Py en mudstone (Formación Westbury)	Corrimiento en losas de concreto	Hawkins and Pinches, 1987
Sainte-Foy, Quebec, Canada	Py generado en lutitas negras (Formación Sainte-Foy)	Losa de concreto corrida más de 10 cm	Berube et.al., 1986
Kansas City, Missouri, USA	Py en lutitas negras (Formación Billings)	Piso de edificaciones corridas hasta 24 cm	Parizek, 1982
Ottawa, Ontario Canada	Py originada en lutitas negras (Formación Eastview)	Basamentos de losas sobrecorridos hasta 6,3 cm por ataque de sulfatos en el concreto	Grattan-Bellew and Eden, 1975
Suroeste de Pennsylvania	Py generado en carbón y lutitas (Formaciones Conemaugh y Monogahela)	Daño estructural debido a sobrecorrimiento	Dougherty and Barsotti, 1972
Ottawa, Ontario Canada	Py en lutitas negras (Capas superiores de Pennsylvanian)	Basamento de losas con grietas y desplazamientos de hasta 10,2 cm	Penner et al., 1970
Oslo, Noruega	Po en lutitas levemente metamorfisadas	Deterioro de concreto por ataque de sulfatos en las fundaciones	Moum and Rosenquist, 1959

Py = Pirita, Po = Pirrotina

7.5.2 Interacción química que entre DAR y concreto (pérdida de componente calcáreo)

Para comprender mejor por qué el DAR genera una pérdida del componente calcáreo en las obras construidas con concreto, a continuación se explican las reacciones químicas que ocurren cuando existe interacción entre el ácido sulfúrico, generado por los materiales ricos en sulfuros y sulfatos del sitio, y los carbonatos presentes en concreto y los agregados pétreos. Además se muestran los resultados de pruebas químicas realizadas en el concreto lanzado afectado por el DAR.

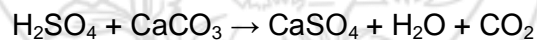
El término “drenaje ácido de rocas” hace referencia a la acidificación de las aguas naturales como consecuencia de la descomposición por oxidación de rocas que contienen minerales metálicos ricos en azufre, sulfuros y sulfatos (p.ej., pirita, arsenopirita, marcasita, calcopirita, esfalerita y jarosita entre otros). Estos tienden a oxidarse al estar expuestos a los agentes naturales como el agua y el aire. Durante el proceso de oxidación del mineral, se libera azufre, el cual se combina con el agua y el oxígeno del aire para formar ácido sulfúrico.

Por otra parte, el concreto está formado por cemento, agregados líticos finos y gruesos, y en algunos casos aditivos que se agregan para mejorar ciertas características. El cemento es un conglomerado formado a partir de una mezcla de caliza y arcillas calcinadas que hasta este punto se considera clinker, este se convierte en cemento cuando se agrega yeso ya que aporta las propiedades adecuadas para poder fraguar y endurecerse.

Los agregados pétreos (grava y arena), pueden ser de diferentes orígenes según el tipo de roca que se utilice (rocas ígneas o sedimentarias). Las rocas ígneas en Costa Rica usualmente son volcánicas y pueden contener minerales con calcio dentro de su estructura. Este componente al ser meteorizado puede formar calcita en minerales como las plagioclasas. Si el agregado es de origen sedimentario clástico o bioquímico, el cemento de la matriz de estas rocas puede ser carbonatado.

En los sitios donde está ocurriendo DAR y existen estructuras de concreto (cunetas y pantallas de concreto lanzado p.ej), el ácido sulfúrico reacciona con el carbonato de calcio generando sulfato de calcio, agua y dióxido de carbono, que puede generar ácido carbónico.

Reacción de ácido sulfúrico y carbonato de calcio:



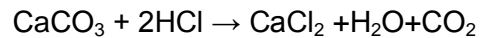
El efecto de esta reacción implica pérdida del componente calcáreo en la estructura, aumento de porosidad, deterioro de la calidad del concreto entre otros. Más adelante se detallan estos efectos y se ejemplifican con materiales obtenidos del km 38+600.

7.5.3 Prueba de determinación de consumo de carbonatos en concreto

En el laboratorio químico del LanammeUCR se llevó a cabo un ensayo para determinar si el concreto lanzado, obtenido del km 38+600, ha sido afectado por DAR y si el componente calcáreo de este ya ha sido consumido por el ácido sulfúrico.

Se realizó una prueba con ácido clorhídrico, el cual al entrar en contacto con un concreto sin alteración debe reaccionar formando cloruro de calcio, agua y dióxido de carbono.

Reacción de ácido clorhídrico y carbonato de calcio:



Por cada mol de carbonato de calcio que reaccionen lo hacen dos de ácido clorhídrico y se forma uno de cloruro de calcio, agua y dióxido de carbono que igualmente puede generar ácido carbónico. Ambos, el ácido sulfúrico como el ácido clorhídrico reaccionan con el carbonato de calcio para formar una sal, agua y dióxido de carbono.

En la siguiente figura se observan ambos lados el bloque de concreto lanzado que fue obtenido del talud del km 38+600, con el cual se realizó este ensayo.



Figura 26. Bloque de concreto lanzado obtenido del talud del km 38+600 de la RN-27, se muestran las tres superficies sobre las cuales se realizó prueba de reacción del componente calcáreo del concreto con ácido clorhídrico. A) Lado expuesto a la intemperie y sección media. B) Se muestra la superficie del bloque que estuvo en contacto con los materiales originales del talud, los cuales que presentan DAR.

En la siguiente figura se muestran las imágenes obtenidas del video grabado durante el ensayo. En esta primera etapa del experimento se colocó el HCl en la superficie del concreto que estuvo expuesta a la intemperie, pero no al DAR.

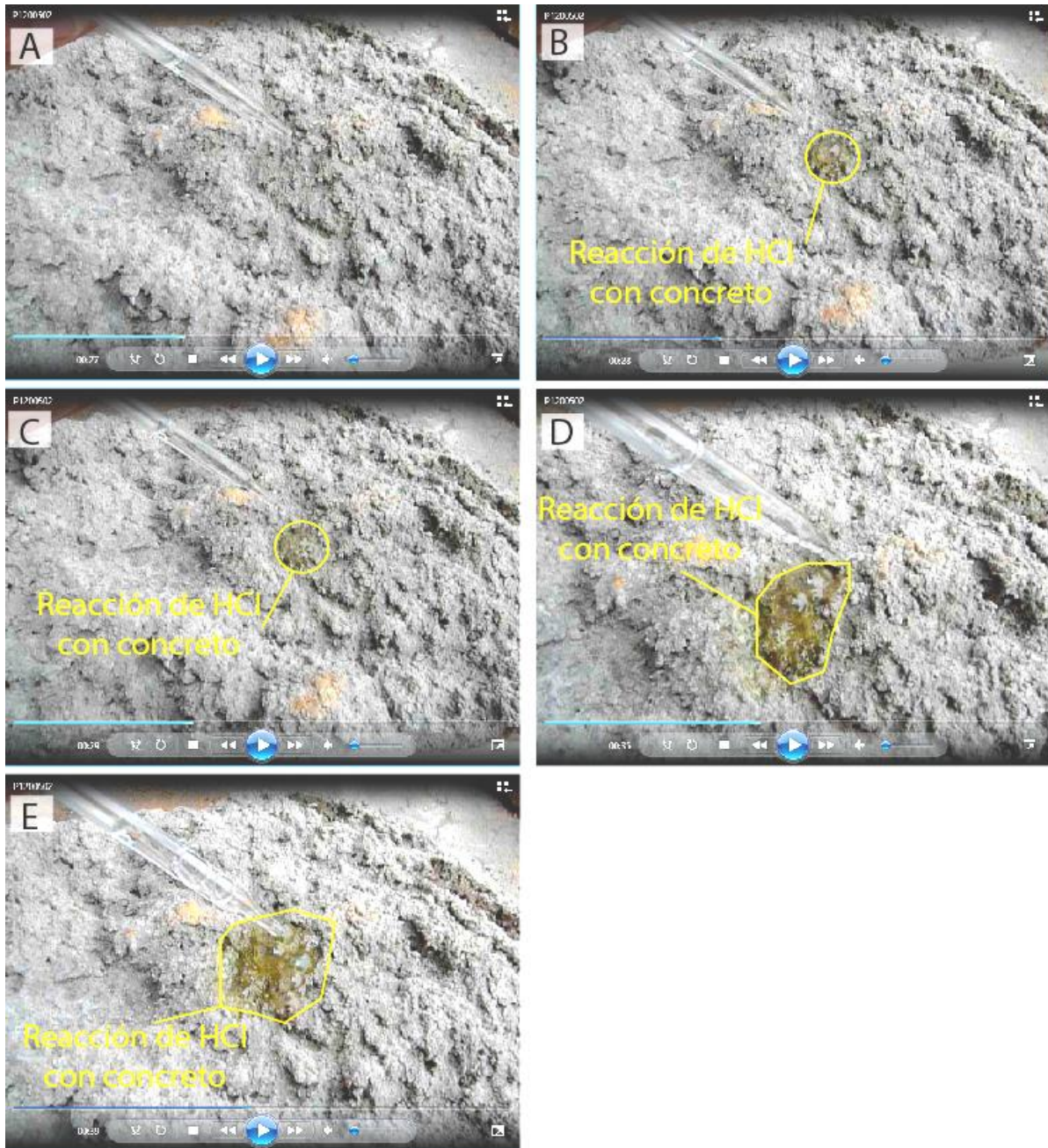


Figura 27. Imágenes tomadas de video, se observa la formación de burbujas en la reacción del HCl al entrar en contacto con la superficie del concreto que estuvo expuesta a la intemperie.

La reacción observada en la figura anterior es una efervescencia y demuestra que la superficie del concreto expuesta a la intemperie pero que no ha estado en contacto directo con el ácido sulfúrico generado por el DAR del sitio, aun contiene su componente calcáreo. Se genera efervescencia CO_2 al reaccionar los carbonatos presentes con el HCl.

En la segunda etapa del experimento se colocó el HCl en la superficie del concreto que estuvo en contacto con el medio ácido del talud del km 38+600, según se aprecia en la siguiente figura.

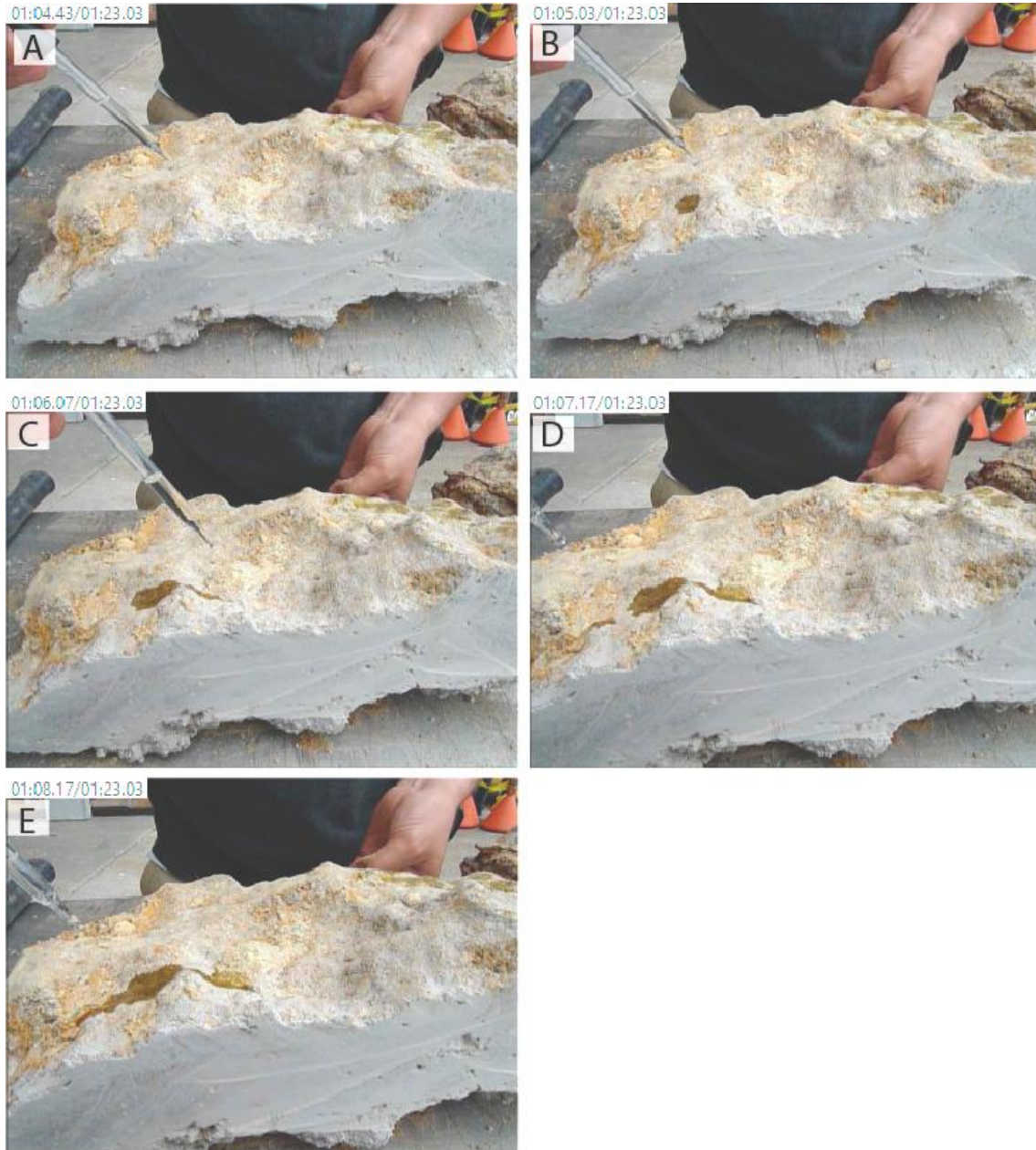


Figura 28. Imágenes tomadas video, se observa que no hay reacción del HCl cuando entra en contacto con el concreto que ya ha sido afectado por DAR.

El resultado obtenido en esta superficie comprueba que el concreto que ha estado en contacto con los materiales del talud y el ácido sulfúrico, ha consumido su componente calcáreo, por lo tanto, no se observa una reacción con efervescencia como sí ocurrió en el concreto del lado opuesto.

En la última etapa de este ensayo se colocó HCl en la zona intermedia del concreto lanzado, obtenido del km 38+600. El resultado se aprecia en la siguiente figura.

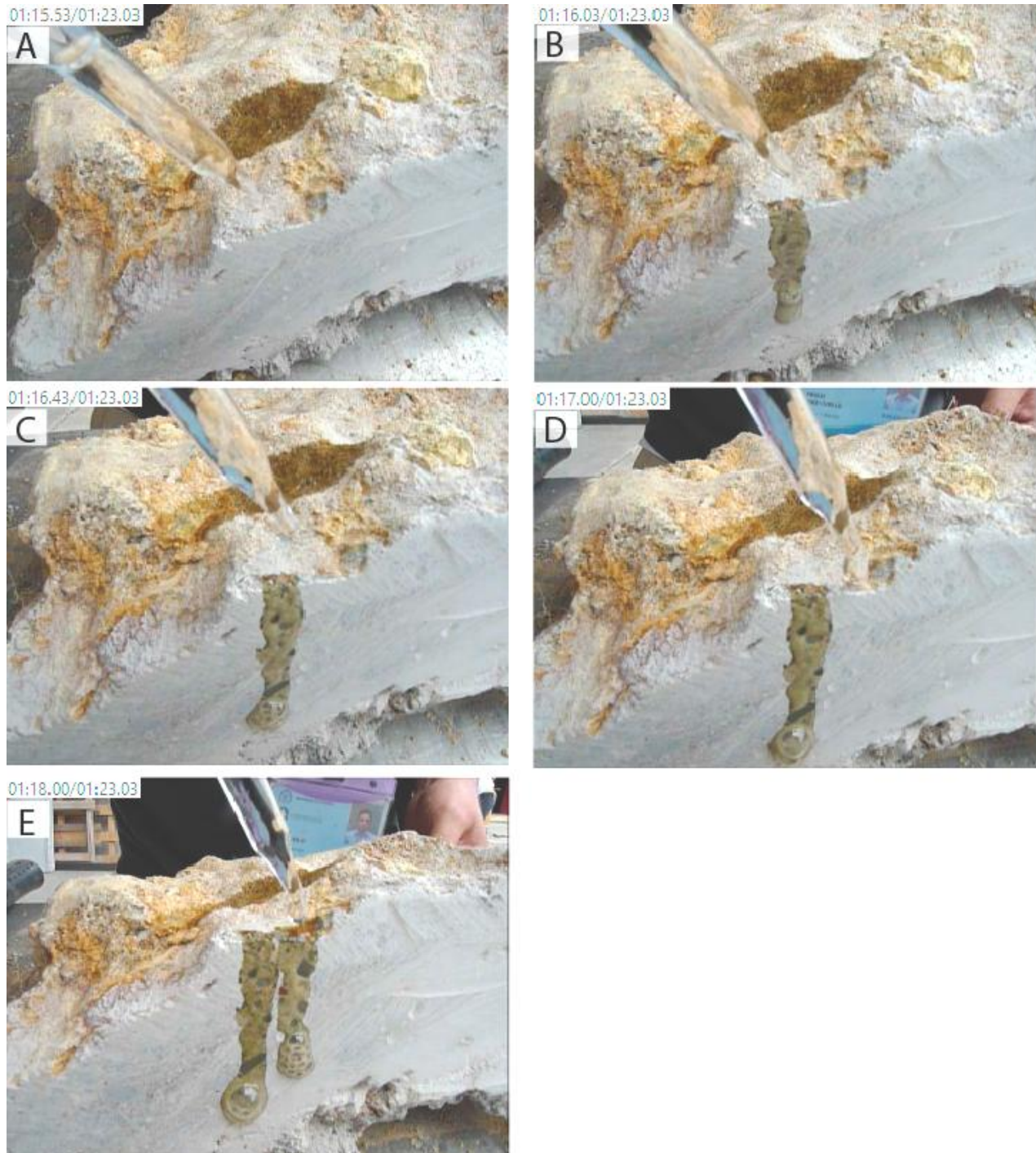


Figura 29. Imágenes tomadas de video, se observa reacción del HCl al entrar en contacto con la sección media del bloque de concreto, la cual no ha estado expuesta directamente al medio ácido del talud. No se observa reacción con los líticos del agregado.

Según se observa, en la sección media aún se ha preservado el componente calcáreo de concreto, por esta razón sí se observa una efervescencia cuando el HCl fluye por ella. Además no se observa reacción con los líticos del agregado.

Por lo tanto, se puede afirmar que el concreto lanzado muestra una pérdida significativa de los componentes calcáreos producto del DAR, lo que contribuye a aumentar la porosidad del concreto y facilitando la incorporación de humedad en la matriz cementante. El concreto en esta condición disminuye en gran medida la capacidad de aislar el acero de refuerzo, exponiéndolo a la corrosión, tal como se analizará en la siguiente sección.

7.6 Afectación en el acero producto del DAR

Se presentan los resultados que se obtuvieron de observaciones y mediciones realizadas en el acero del talud del km 38+600 que ha sido afectado por el drenaje ácido de roca.

7.6.1 Descripción de oxidación y corrosión

En lo que respecta al acero de refuerzo, se observaron diversos grados de oxidación en la malla electrosoldada, así como en los pines empleados para la fijación de la malla al talud.

En algunos casos, el proceso de oxidación evolucionó hasta la corrosión del refuerzo con pérdida de sección, tal como se aprecia en las siguientes figuras (30 a 33).



Figura 30. Deterioro por corrosión observado en las varillas de acero, muestras del concreto del km 38+600.

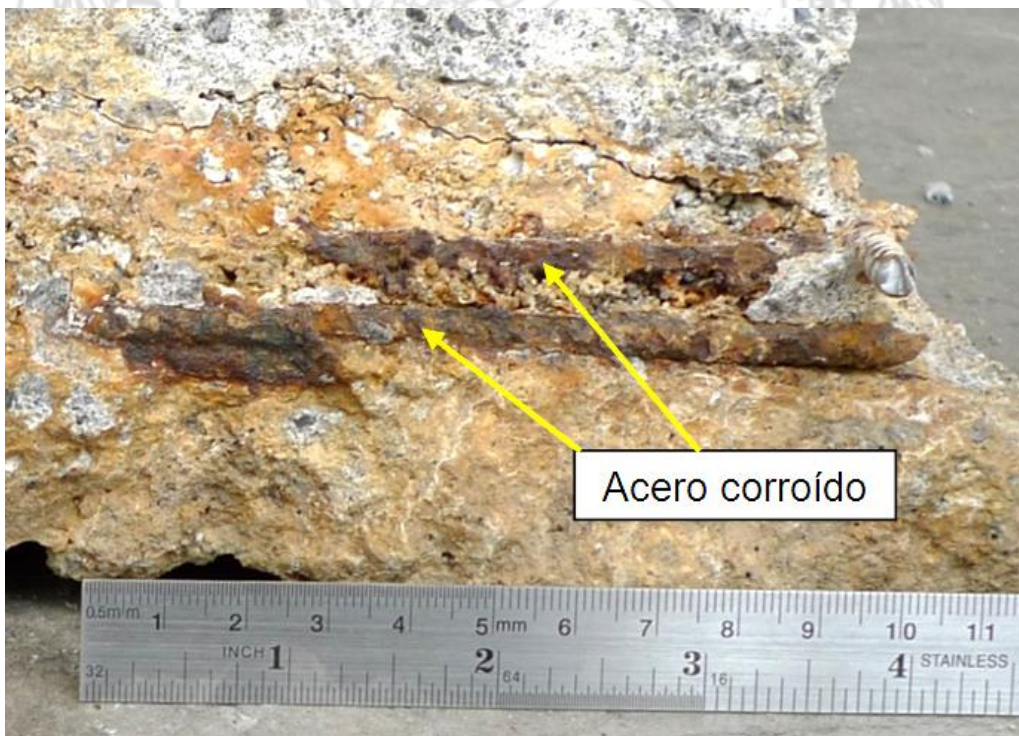


Figura 31. Acero con diferentes grados de corrosión, localizado dentro de la zona de alteración del concreto.

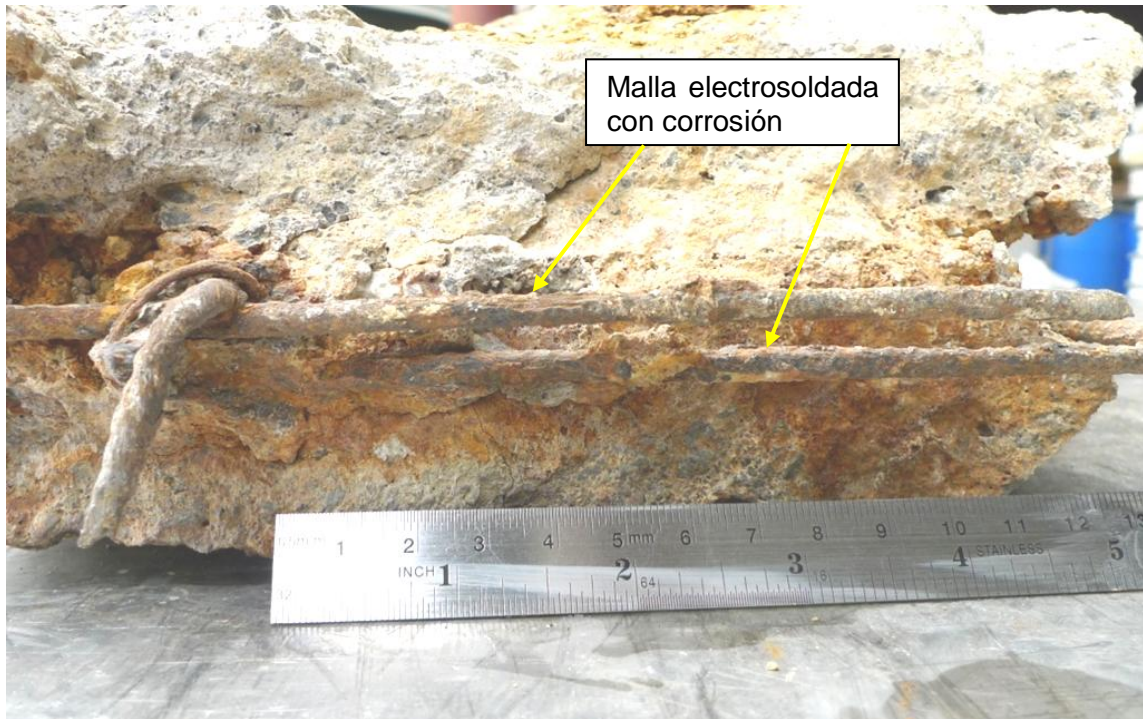


Figura 32. Detalle del deterioro por oxidación y corrosión presente en la malla electrosoldada.



Figura 33. Pérdida de sección observada en una varilla de acero No. 4, la cual estuvo dentro de la matriz de suelo y la roca del talud en el km 38+600, RN-27. A esta misma varilla se le realizaron análisis detallados que se presentan más adelante en este informe.

En las muestras obtenidas se observaron diversos grados de alteración, tanto en el concreto lanzado como en las varillas de refuerzo. Varias de estas muestras fueron cortadas con equipo mecánico para conocer la condición en el interior del concreto.

En la siguiente figura se presenta en detalle uno de los cortes realizados a las muestras de concreto. Tal como se observa, en este caso la zona alrededor de la varilla no presenta alteración detectable a simple vista. En este caso el acero muestra una sección completa, sin que se observe oxidación o corrosión.

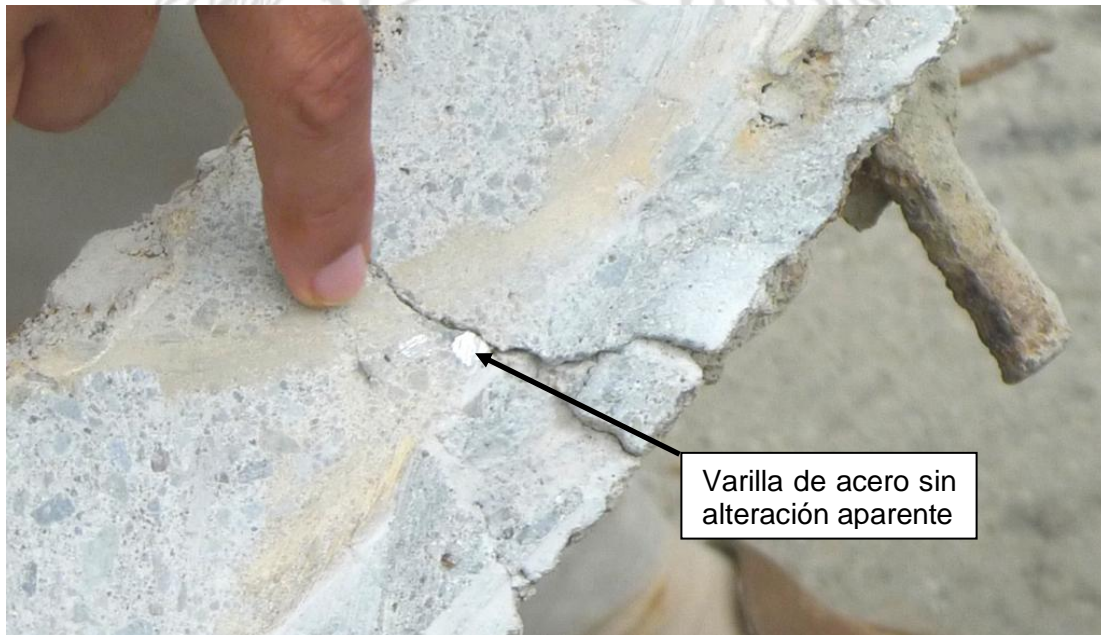


Figura 34. Varilla de malla electrosoldada sin alteración evidente, confinada dentro del concreto.

La variación existente en los grados de alteración del concreto y el acero son producto de la variabilidad en el grado de exposición de estos materiales al drenaje ácido del sitio (demostrado en la sección 7.3 de este informe). Los mecanismos mediante los cuales los ácidos entran en contacto con el acero y el concreto serán analizados más adelante en este informe.

Varios factores se deben conjugar para desencadenar la corrosión del acero de refuerzo en el concreto. En el “*Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*” (DURAR) del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología (3ra Edición, agosto 2000), se indica que serán factores que afectan o desencadenan la corrosión aquellos que den lugar a una neutralización del medio alcalino propio del hormigón, tales como iones despasivantes de Cl^- , SO_4 , etc. o cualquier líquido que neutralice la alcalinidad del concreto. “La presencia de sulfatos en un agua que esté en contacto con una pasta endurecida de cemento, puede incrementar considerablemente la solubilidad de los componentes de dicha pasta y causar el desarrollo de la degradación del hormigón por lixiviación y también una reacción de cambio de base, originándose la degradación del hormigón por reacción de cambio iónico” (DURAR, 2000).

La condición antes mencionada es precisamente la que se está presentando en el concreto reforzado que fue colocado en el talud del km 38+600 de la RN-27, sumándose a los factores que han llevado al colapso de la estabilización implementada.

Continuando con los análisis realizados al acero de refuerzo, en las muestras en las cuales éste encontraba contenido dentro del concreto, el acero fue obtenido tal como se muestra en la siguiente figura.



Figura 35. Separación en el laboratorio del refuerzo de acero.

Seguidamente se presentan las observaciones realizadas sobre la condición del acero de refuerzo.

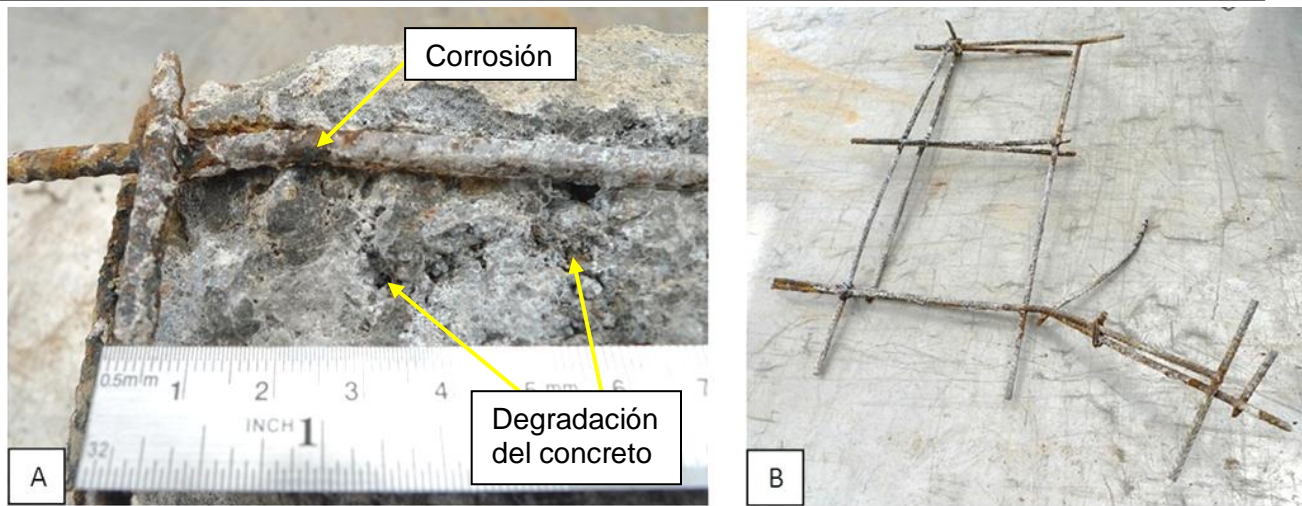


Figura 36. A) Corrosión identificada en el acero de refuerzo del concreto lanzado, km 38+600 RN-27, se observó además pérdida de la matriz cementante del concreto en el interior de la muestra. B) Sección de malla electrosoldada con signos visibles de oxidación y corrosión.



Figura 37. A) Acero afectado por la corrosión con evidencia de iniciar el proceso de descamación. B) Varillas de la malla electrosoldada con grado avanzado de corrosión, incluso presentan pérdida de sección.

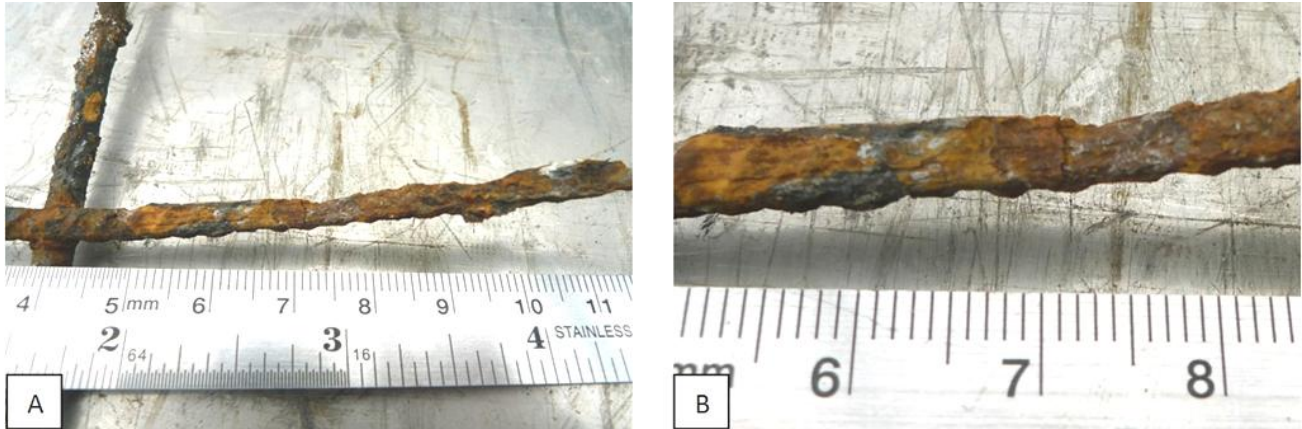


Figura 38. A) Acero de la malla electrosoldada severamente afectado por la corrosión. B) Detalle de la pérdida importante de sección en la varilla.

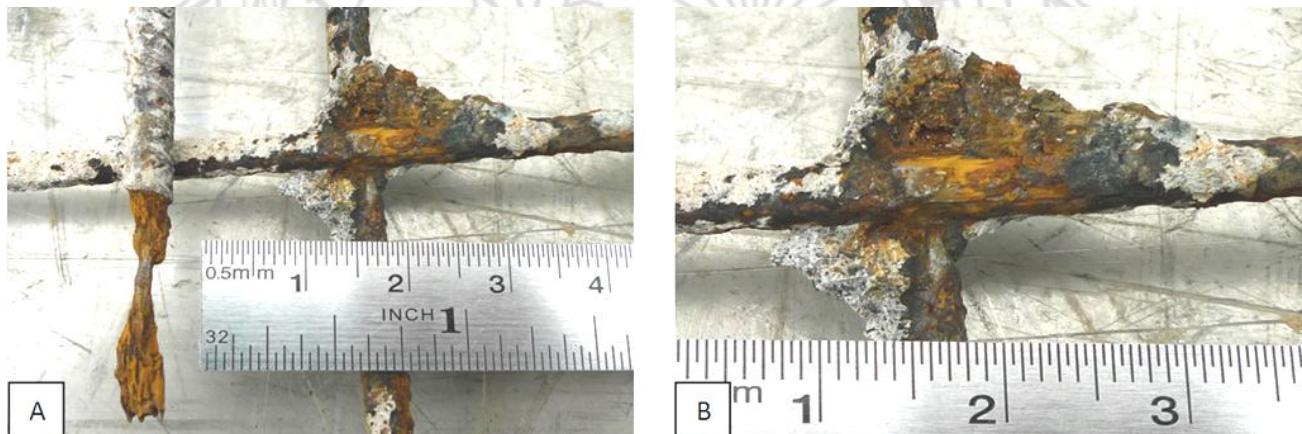


Figura 39. A) Punto de unión de las varillas de la malla electrosoldada con corrosión severa, se aprecia también la varilla izquierda en la que prácticamente todo el acero se ha perdido. B) Detalle de la corrosión en la unión de las varillas.

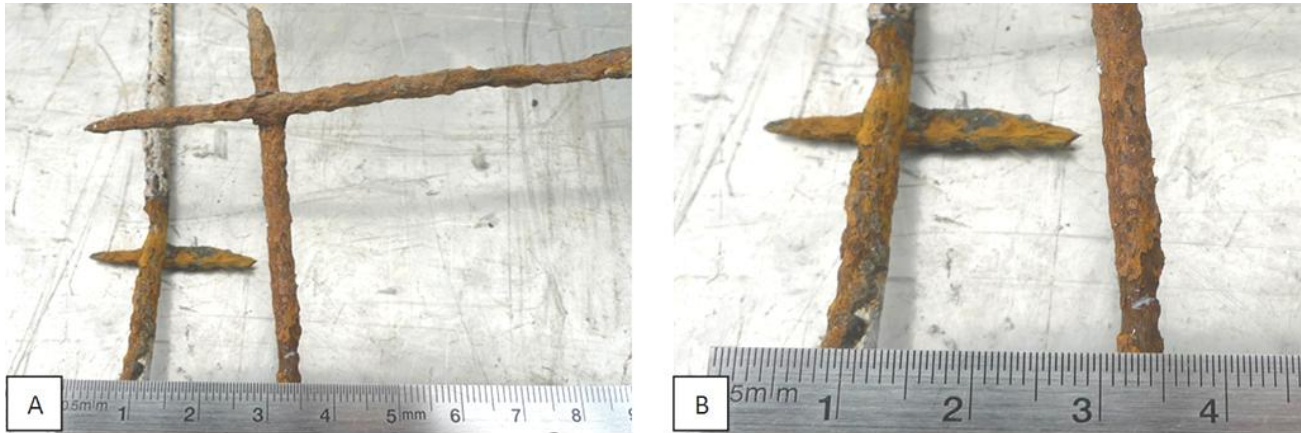


Figura 40. A) Unión de las varillas de la malla electrosoldada con corrosión severa. B) Detalle de la corrosión y la pérdida de sección en el acero.

En las figuras 36 a 40 se observan los grados avanzados de deterioro que presenta el acero de refuerzo del concreto lanzado. En todos estos casos la corrosión es severa, el acero en esta condición ha disminuido su capacidad de resistir esfuerzos de tensión y, por lo tanto, su aporte de resistencia al concreto. La resistencia a la tensión del acero deteriorado es evaluada en la sección 7.6.3 de este informe.




7.6.2 Evaluación de la sección transversal

El diámetro de las varillas de la malla electrosoldada fue medido con un calibrador o Vernier (código UCR PR-003), con el fin de determinar la pérdida del área en la sección transversal.

En los siguientes cuadros se muestran los resultados de estas mediciones, así como el porcentaje de variación del área transversal, con respecto a la sección original de la varilla sin deterioro. El área transversal de la varilla sin deterioro fue obtenido del promedio de las mediciones de diámetro real (no nominal) realizadas en el LanammeUCR en las varillas sin deterioro, esta área de referencia se estableció en $14,86 \text{ mm}^2$.


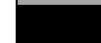

Cuadro 4. Muestra #1. Diámetros medidos y variación en la sección de la varilla de la malla electrosoldada, con respecto a la sección de una varilla sin deterioro (14,86 mm²).

Medición	Diámetro (mm)	Área (mm ²)	Variación del área
1	3,98	12,44	-17,4%
2	3,87	11,76	-21,9%
3	4,26	14,25	-5,4%
4	4,69	17,28	14,7%
5	4,65	16,98	12,7%
6	4,37	15,00	-0,4%
7	4,06	12,95	-14,1%
8	4,33	14,73	-2,3%
9	4,40	15,21	0,9%

	Disminución
	Máxima disminución
	Aumento


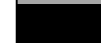

Cuadro 5. Muestra #2. Diámetros medidos y variación en la sección de la varilla de la malla electrosoldada, con respecto a la sección de una varilla sin deterioro (14,86 mm²).

Medición	Diámetro (mm)	Área (mm ²)	Variación del área
1	4,38	15,07	0,0%
2	4,74	17,65	17,1%
3	2,33	4,26	-71,7%
4	4,56	16,33	8,4%
5	4,73	17,57	16,6%
6	4,12	13,33	-11,5%
7	4,31	14,59	-3,2%
8	2,55	5,11	-66,1%
9	4,50	15,90	5,6%

	Disminución
	Máxima disminución
	Aumento

Cuadro 6. Muestra #3. Diámetros medidos y variación en la sección de la varilla de la malla electrosoldada, con respecto a la sección de una varilla sin deterioro (14,86 mm²).

Medición	Diámetro (mm)	Área (mm ²)	Variación del área
1	1,96	3,02	-80,0%
2	4,40	15,21	0,9%
3	4,20	13,85	-8,0%
4	4,60	16,62	10,3%
5	4,52	16,05	6,5%
6	4,61	16,69	10,8%
7	4,68	17,20	14,2%
8	4,07	13,01	-13,6%
9	3,40	9,08	-39,7%

	Disminución
	Máxima disminución
	Aumento

Del análisis de los resultados mostrados en los tres cuadros anteriores se derivan las siguientes observaciones:

- El área de las varillas de refuerzo del concreto lanzado del km 38+600 presenta grandes variaciones con respecto a su sección original. Tanto por disminución de la sección como por expansión.
- En algunas secciones las varillas presentan una expansión del área transversal de hasta 17%. Esto se debe a la combinación de varios factores, dentro de los que se encuentran la formación de óxido alrededor de la varilla y la acumulación de sales producto de las reacciones que se originan en la matriz cementante del concreto que está en contacto con la varilla, en este caso producto también del drenaje ácido. La expansión de la sección de la varilla genera esfuerzos en el concreto que la rodea, esto promueve la formación de nuevas grietas en el concreto, lo que aumenta a su vez la exposición del acero a los agentes de deterioro externos, tales como el DAR.
- En las varillas de las mallas electrosoldadas estudiadas en el laboratorio, la disminución en el área de la sección transversal es de 25,4% en promedio.
- La disminución en la sección transversal de las varillas que forman parte del refuerzo del concreto lanzado del km 38+600 en la RN-27 llega a porcentajes del 80%.

Adicionalmente, en una de las varillas empleadas para la fijación temporal de la malla electrosoldada al talud del km 38+600, se realizaron dos mediciones adicionales, con el propósito de medir la pérdida de masa (medida como peso) y la pérdida de resistencia a la tensión.

Este cabo de varilla es el que se presentó en la figura 33 de este informe. En la siguiente figura se muestra nuevamente esta varilla, luego de haber sido separada del concreto.



Figura 41. Varilla obtenida del talud en el km 38+600. Es un cabo de varilla #4, de 48,9 cm de longitud. Se observa el deterioro severo del acero en el tramo que estuvo dentro del medio ácido del talud, con pérdida importante de su sección.

El extremo de la varilla que estuvo expuesto a la intemperie, por fuera del concreto lanzado, presenta muy poco deterioro, midiendo su diámetro se determinó que corresponde con una varilla No.4 (12,7 mm).

En el siguiente cuadro se presentan las mediciones realizadas para determinar diámetro de esta varilla, con el fin de determinar la variación en la sección transversal, producto de haber permanecido aproximadamente seis años inmersa en un medio con Drenaje Ácido de Rocas.

El área transversal de una varilla No.4 sin deterioro fue obtenido del promedio de las mediciones de diámetro real (no nominal) realizadas en el LanammeUCR, está área de referencia es de 118,58 mm².

Cuadro 7. Varilla No.4 obtenida del talud del km 38+600. Diámetros medidos y variación en la sección de la varilla, con respecto a la sección original de una varilla sin deterioro (118,58 mm²).

Medición	Diámetro (mm)	Área (mm ²)	Variación del área
1	13,79	149,35	26,0%
2	13,81	149,79	26,3%
3	10,89	93,14	-21,5%
4	10,77	91,10	-23,2%
5	8,51	56,88	-52,0%
6	4,92	19,01	-84,0%
7	5,40	22,90	-80,7%
8	4,85	18,47	-84,4%
9	7,10	39,59	-66,6%

	Disminución
	Máxima disminución
	Aumento

En el cuadro anterior se observan las importantes variaciones en el área de la varilla No.4 con respecto a una varilla sin alteración. Las dos mediciones que reflejan aumento de sección se deben a la combinación de varios factores, incluida la formación de óxido alrededor de la varilla y la acumulación de sales producto de las reacciones que se originan en la matriz cementante del concreto que está en contacto con la varilla, en este caso incrementadas por el drenaje ácido.

Tal como se ha mencionado, el aumento en la sección de la varilla genera esfuerzos en el concreto que la rodea, esto promueve la formación de nuevas grietas en el concreto, lo que aumenta a su vez la exposición del acero a los agentes de deterioro externos, tales como el DAR.

El resto de las mediciones reflejan grandes pérdidas de acero en la varilla, incluso mayores al 80%. Estos datos son muy similares a los que se obtuvo con el acero de las varillas de la malla electrosoldada presentados anteriormente.

Identificar el diámetro original permitió además comparar la varilla obtenida en el talud del km 38+600 con un tramo de varilla del mismo diámetro y la misma longitud, con el peso y la resistencia originales, pero sin la corrosión y los deterioros observados.

En la siguiente figura se presentan la varilla deteriorada y la varilla sana empleada para dicha comparación, así como la medición del peso de cada una. Las mediciones fueron realizadas el día 30 de setiembre del 2015 en el LanammeUCR.



Figura 42. Varillas No.4 comparadas en el laboratorio. A) Ambas varillas miden 48,9 cm. B) y C) Comparación de los diámetros de las varillas. D) Pesaje de la varilla sin alteración. E) Pesaje de la varilla con alteración obtenida del km 38+600 de la RN 27.

La varilla sin deterioro registró un peso de 466,4 g, por su parte el peso determinado para la varilla con alteración obtenida del km 38+600 de la RN 27 fue de 290,2 g. Según los datos de peso obtenidos, la varilla que estuvo incrustada en el medio ácido del talud del km 38+600, experimentó una disminución de 176,2 g, equivalente a una pérdida del 37,8% de su peso.

Esta pérdida significativa de acero se traduce en una disminución en la resistencia a la tensión del elemento. Estos deterioros son muy preocupantes, ya que una parte de la resistencia al deslizamiento del talud es aportada por la resistencia de las varillas de anclaje que han sido colocadas en el talud del km 38+600.

En las giras realizadas para documentar el deterioro de este talud se han registrado daños importantes en el tramo visible de estos anclajes de refuerzo, los cuales participan de forma directa en el mecanismo de refuerzo del talud.

Estas varillas presentan avanzados estados de corrosión y al haber estado inmersos en el medio ácido del talud, su condición de resistencia debe estar disminuida con respecto a los valores esperados para una obra de contención con pocos años de funcionamiento (aproximadamente 6 años).

En la siguiente figura se presentan algunos de los deterioros observados en la porción visible de los anclajes que forman parte de la obra de estabilización de este talud.

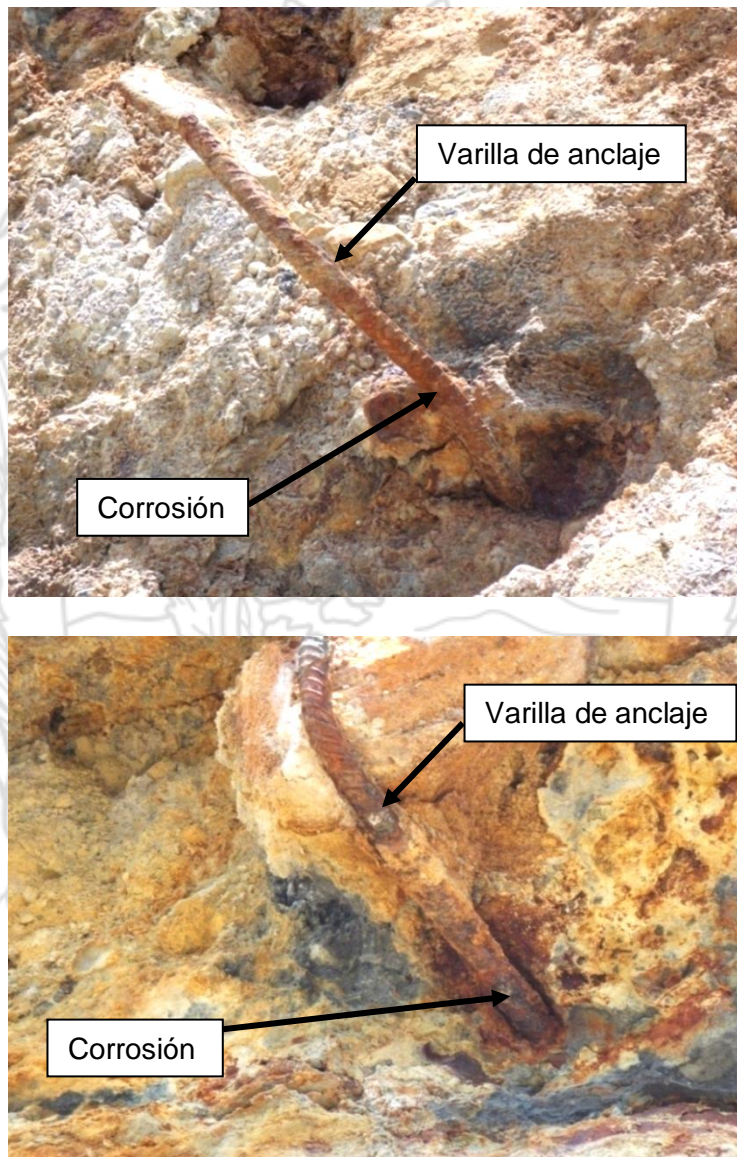


Figura 43. Condición que tienen actualmente muchos de los anclajes de refuerzo en el talud del km 38+600. Se observan diferentes grados de corrosión en el acero que ha quedado expuesto luego del deslizamiento.

7.6.3 Resistencia a la tensión

Considerando los graves deterioros observados tanto en la malla electrosoldada empleada para el refuerzo del concreto lanzado, como en las varillas de anclaje del km 38+600 de la Ruta Nacional No.27, se realizó una prueba comparativa de la resistencia a tensión del acero deteriorado contra un espécimen del mismo diámetro y longitud pero en su condición original, sin los deterioros causados por el DAR.

Los especímenes ensayados son los mismos que se estudiaron en la sección anterior, en la siguiente figura se presentan nuevamente.



Figura 44. Varillas de acero antes del ensayo a tensión en la Máquina Universal. La varilla en la parte superior de la figura es la varilla deteriorada obtenida del talud al lado derecho del km 38+600 de la RN-27. La varilla sin deterioro empleada como referencia comparativa tiene el mismo diámetro y longitud de la varilla deteriorada en su condición original.

Ambas varillas fueron ensayadas a tensión en la Máquina Universal modelo MTS 810 con capacidad de 250 kN, placa MU-005, propiedad del LanammeUCR.

En la siguiente figura se muestran las dos varillas colocadas en la máquina durante el ensayo, así como la zona de falla luego de terminado el ensayo.

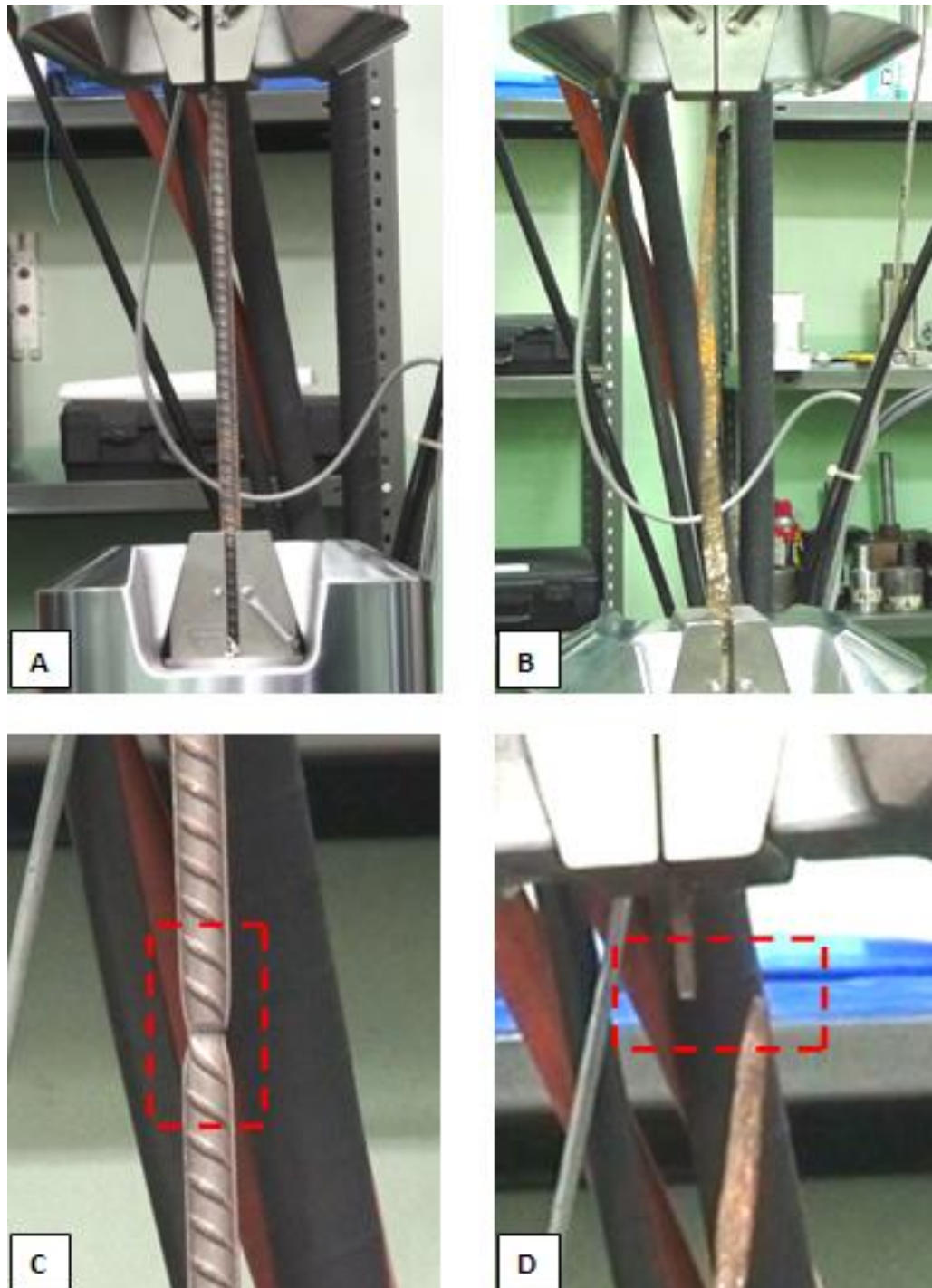


Figura 45. Ensayo de las varillas en la Máquina Universal. A) Varilla sin deterioro durante el ensayo. B) Varilla deteriorada obtenida del talud derecho del km 38+600 RN-27. C) Zona de falla de la varilla sin deterioro, se observa la reducción de la sección transversal. D) Zona de falla en la varilla deteriorada, la falla se presentó en la sección más delgada de la varilla, tal como se esperaba.

En la figura 46 se observa en detalle la condición de las varillas luego de la falla en la Máquina Universal.

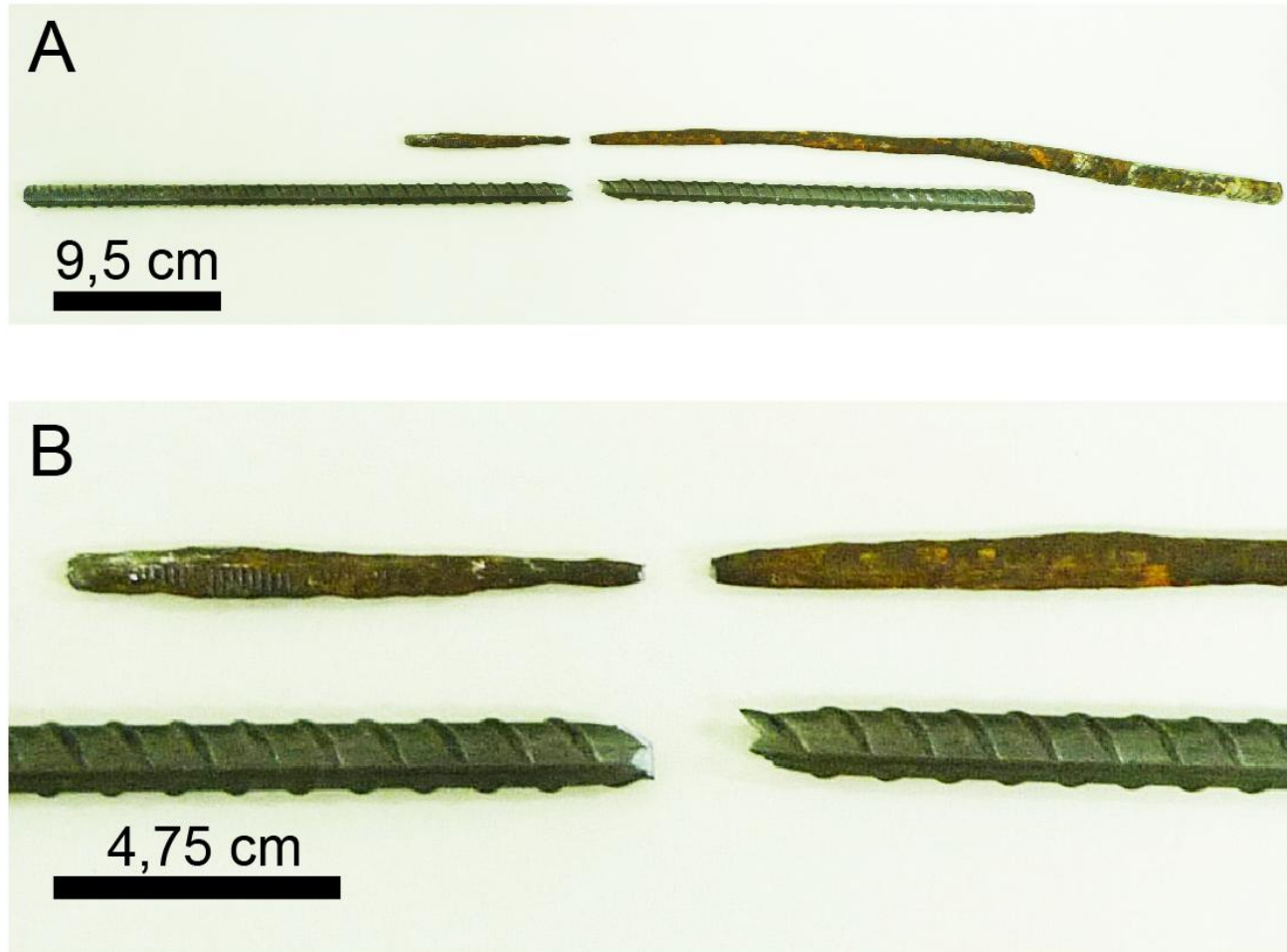


Figura 46. A) Condición de las varillas luego de realizado el ensayo a tensión. B) Detalle del punto de falla en ambas varillas.

En la figura anterior se puede observar la reducción en la sección transversal que se produjo en la zona de falla de la varilla sin deterioro, la cual tuvo lugar en la zona media de su longitud, este es un comportamiento típico de la falla en un material dúctil. La varilla deteriorada del km 38+600 falló en la zona más delgada, pero no presentó este comportamiento de reducción de la sección producto de la falla a tensión.

El registro digital de los valores del ensayo permite relacionar los valores de carga y deformación. La relación entre estos parámetros permite comprender el comportamiento que tendrán los materiales bajo condiciones de trabajo. Este comportamiento (Carga - Deformación), es obtenido de los resultados del ensayo, y se presenta en el siguiente gráfico.

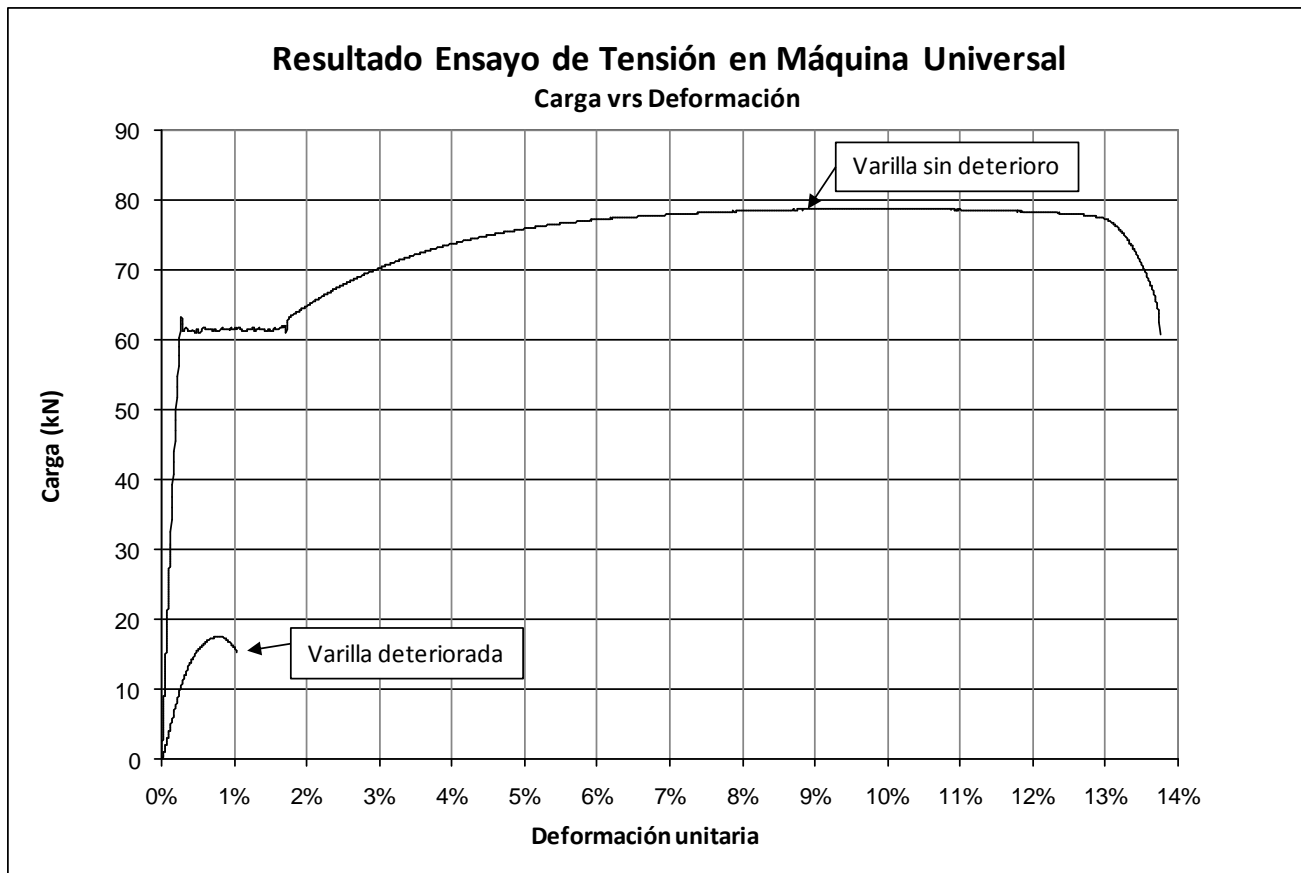


Gráfico 1. Relación Carga – Deformación Unitaria para ambas varillas, resultado del ensayo de tensión.

Según se observa, la varilla sin deterioro presenta un comportamiento elástico inicial, en el cual tiene capacidad de resistir elevadas cargas de tensión con bajas deformaciones, menores al 0,3%.

Luego inicia una zona de fluencia, caracterizada por un aumento en la deformación y carga aproximadamente constante (meseta de fluencia). Posteriormente el acero sin deterioro experimenta un endurecimiento por deformación hasta que alcanza la tensión máxima, luego del cual la carga resistida decrece y el material falla. Este comportamiento es típico de los materiales dúctiles como las varillas de acero.

El comportamiento de la varilla deteriorada del km 38+600 presenta una tendencia muy diferente. Tal como se observa en el gráfico anterior, al aumentar la carga, inicialmente la varilla deteriorada experimenta una deformación que es aproximadamente lineal en relación a la carga aplicada.

Luego de superado el límite de proporcionalidad lineal, cerca del 0,4% de deformación, el crecimiento de la carga resistida empieza a decaer. Pasado este punto con muy poco aumento de la carga se alcanza la carga máxima y el material rápidamente alcanza el punto de falla.

Por lo tanto, la varilla deteriorada del km 38+600 presenta un comportamiento marcadamente frágil, no dúctil como la varilla sin deterioro.

En el cuadro 8 se comparan los resultados obtenidos para la carga y la deformación unitaria en ambas varillas.

Cuadro 8. Comparación de carga máxima y deformación unitaria producto del ensayo a tensión.

Parámetro medido	Varilla sin deterioro	Varilla deteriorada	Relación entre valores
Carga máxima (kN)	78,73	17,52	4,5
Deformación unitaria en la falla	9,55%	0,78%	12,2

De acuerdo con estos resultados, la varilla sin deterioro tiene capacidad de resistir 4,5 veces más fuerza que la varilla deteriorada que estuvo inmersa en el medio ácido del talud del km 38+600, en la Ruta Nacional No.27. Además, la varilla sin deterioro registró una deformación unitaria 12,2 veces mayor que la varilla deteriorada al momento de alcanzar la falla. En resumen, la varilla deteriorada que fue ensayada para este informe soporta mucho menos carga, y con muy poca deformación falla de manera frágil. Los datos obtenidos prueban que en ese talud de la carretera San José – Caldera se están generando condiciones que provocan disminución de la capacidad del acero de resistir carga tensional, grados severos de corrosión, y pérdida de ductilidad del acero. Esta situación, así como la degradación del concreto y los diferentes deterioros descritos en este informe, afectan de manera directa la durabilidad y el desempeño de las obras de estabilización y protección construidas por el Concesionario en el talud con DAR del km 38+600.

El mecanismo mediante el cual el medio ácido del talud participa en el deterioro de los materiales y degrada la calidad de las obras es analizado en la siguiente sección.

7.7 Mecanismo de deterioro y falla del talud 38+600

Por varios años funcionarios del LanammeUCR han dado seguimiento a los cambios que han experimentado los taludes en este tramo de la carretera San José – Caldera. Debido al acelerado deterioro que se ha observado, desde el año 2013 se han emitido informes (LM-PI-UGERVN-005-2013) para comunicar al Consejo Nacional de Concesiones las preocupaciones sobre la condición de las obras construidas para la estabilización y protección del talud al lado derecho de la carretera (sentido San José – Caldera).

Esta labor de seguimiento a los cambios en el talud, ha brindado información muy valiosa y precisa sobre los factores involucrados y sobre el proceso que ha generado el acelerado deterioro de las obras ahí construidas.

En esta sección se presenta una descripción del mecanismo de deterioro observado, y cómo el DAR ha participado en el proceso de desprendimiento del concreto y la caída de material.

Inicialmente cuando se realizó el corte para construir la carretera, se expusieron al ambiente materiales que presentaban alteración hidrotermal. Posteriormente se colocaron anclajes de varilla de acero, con una pantalla de concreto lanzado y malla electrosoldada, así como drenajes sub horizontales.

Inicialmente los drenajes sub horizontales permitieron evacuar el agua infiltrada. Sin embargo, el agua de lluvia con un pH original de 6,5 aumentó su acidez al interactuar con los materiales que conforman el talud, favoreciendo la generación de sales y otros lixiviados de las rocas, los cuales con el paso del tiempo fueron colmatando los drenajes.

Las evidencias de la generación de sales y lixiviados se pueden ver en las eflorescencias que presenta el concreto en la parte expuesta a la intemperie y las coloraciones rojizas y anaranjadas por lixiviación de óxidos de hierro (ver figuras 11, 12 y 13 en la sección 7.5.1 de este informe).

La reducción en la capacidad de los drenajes sub horizontales de evacuar el agua generó aumento de presiones de agua acidificada en la parte posterior del concreto. Esto aumentó la exposición del concreto al medio ácido que se produce en el talud, tal como ha sido demostrado en este informe.

Los ácidos presentes en el medio, al entrar en contacto con el concreto reaccionan con el componente calcáreo de este último, lo que se traduce en una pérdida local de la matriz cementante del concreto. Los efectos de este deterioro han sido observados en las muestras de concreto obtenidas en el sitio y analizados en las secciones anteriores (ver figuras 20 a 25).

El 27 de octubre del 2014 se realizó una prueba de acidez en el agua que se observó saliendo al pie de este talud, estableciendo un pH de 5,5 (LM-PI-UGERVN-003-2015). El aumento de la acidez en el agua al pie del talud es evidencia del flujo ácido al que ha estado expuesto el concreto y el acero en este talud, lo que resulta coherente con los deterioros observados en las muestras de concreto descritos a lo largo de este informe.

En el concreto degradado se generan zonas y grietas que permiten el ingreso y la salida del agua, aumentando la exposición a la acidez y facilitando la pérdida de la fracción fina del suelo que se encuentra detrás de la pantalla de concreto. Las nuevas grietas aceleran el proceso de corrosión en el acero (ver figuras 30 a 40), lo que deriva en una pérdida de resistencia y mayor deterioro agravada por los cambios de temperatura debido los ciclos de día y noche, sol y lluvia.

Una vez alcanzada la condición severa de deterioro (ver figuras 31 a 33 y 36 a 40, sección 7.6.1 de este informe) , generada por el proceso de DAR, el empuje hidrostático ácido provocó la caída del concreto agrietado, junto con suelo y rocas propias del talud, tal como se observó en el deslizamiento del domingo 9 de agosto del 2015. El deterioro acelerado en el concreto lanzado y la corrosión de la malla electrosoldada es una consecuencia directa del agua ácida generada por el DAR del sitio.

En la figura 47 se muestra en forma gráfica el resumen de los puntos descritos anteriormente para facilitar la comprensión del mecanismo de deterioro y falla de la obra de contención.

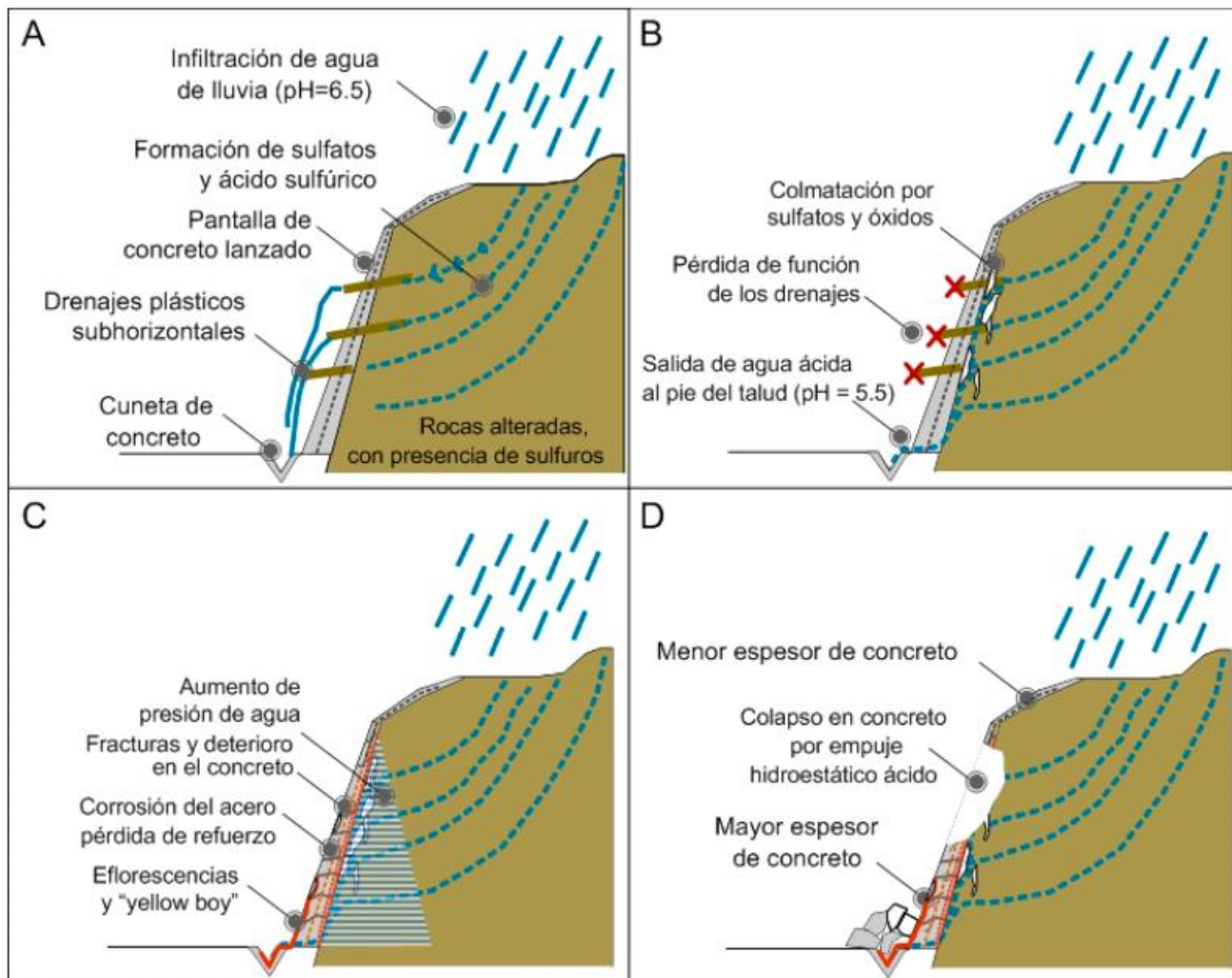


Figura 47. A) Las rocas alteradas hidrotermalmente del talud original con presencia de sulfuros y sulfatos fueron expuestas a condiciones óxicas y de interacción con humedad y agua de lluvia cuando se hicieron los cortes para construir la carretera. Los materiales, fueron cubiertos por concreto lanzado y se colocaron sub drenajes para propiciar la salida de agua infiltrada. B) Al infiltrarse el agua de lluvia con un pH promedio de 6.5 e interactuar con los sulfatos y sulfuros de la rocas se generó un aumento en su acidez, además se generaron sulfatos que lentamente saturaron y provocaron la colmatación de los drenajes, disminuyendo la evacuación del agua infiltrada que para ese momento ya era ácida. C) En el concreto degradado se produjeron grietas que permitieron el ingreso y la salida del agua, así como la pérdida del suelo localizado debajo del concreto. Las nuevas grietas aceleraron el proceso de corrosión en el acero, lo que derivó en pérdida de resistencia y mayor deterioro. D) Una vez alcanzada la condición severa de deterioro, generada por el proceso de DAR, el empuje hidrostático ácido provocó la caída del concreto agrietado, junto con suelo y rocas propias del talud.

7.8 Otros sectores afectados por DAR

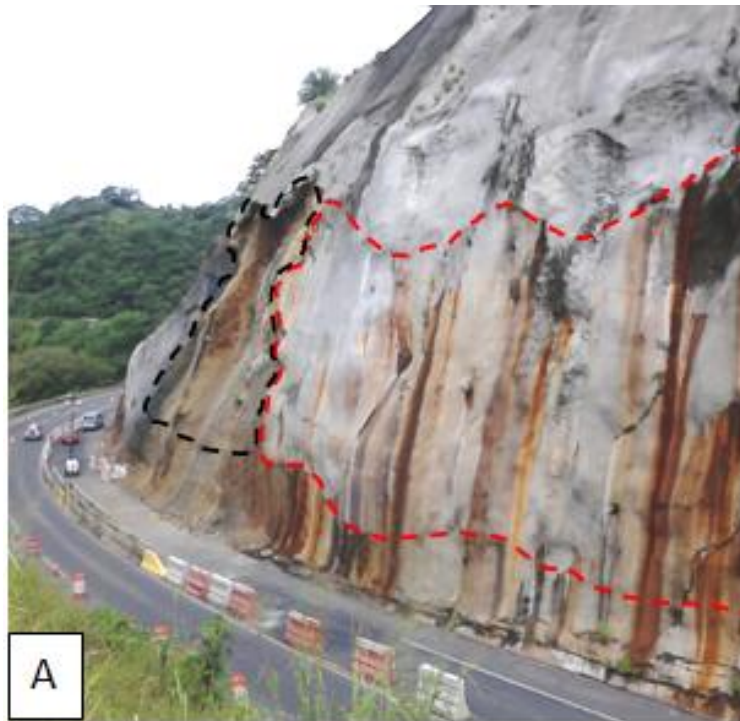
7.8.1 En el sector aledaño al talud del km 38+600

Entre los estacionamientos 38+500 y 38+600 se encontró evidencia de que los taludes están presentando DAR, se observaron además grietas en el concreto, eflorescencias, lixiviación de óxidos de hierro, así como pendientes y alturas similares a las que presentaban los sitios que han sufrido deslizamientos, por lo que se considera con alto potencial de experimentar también desprendimiento del concreto y caída de suelo y rocas.

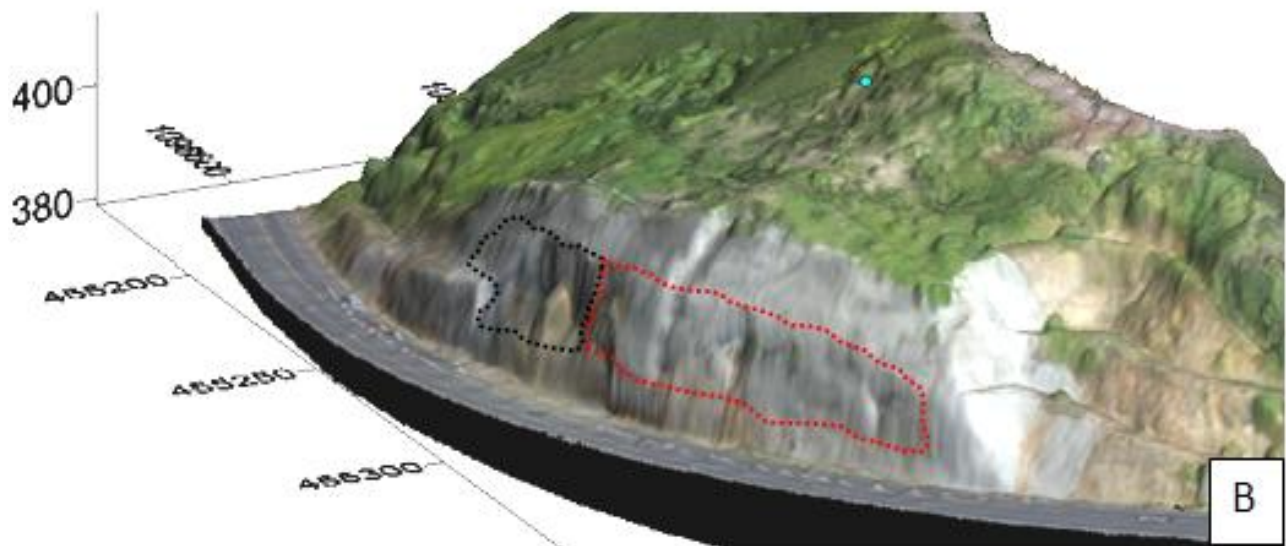
En las figuras 48 y 49 se destacan algunos de estos sectores con alto potencial de sufrir deslizamientos. Se considera urgente diseñar e implementar un plan de intervención para estos sectores, recomendamos que se incluyan medidas en el corto plazo para disminuir la exposición de los usuarios al riesgo derivado de la caída de suelo, rocas y concreto sobre la carretera.



Figura 48. Talud del tramo 38+500 – 38+550 con evidencia de presentar DAR. Presenta además condiciones geotécnicas similares a las del talud del km 38+600, agrietamiento y daños con potencial de provocar la caída de materiales.



A



B

Figura 49. Sectores con alto potencial de presentar deslizamientos, con base en el análisis de las geológicas, las condiciones geotécnicas actuales y la evolución del deterioro del concreto lanzado. A) Fotografía de la zona aledaña al deslizamiento del 9 de agosto. B) Modelo de elevación digital, perspectiva completa del talud del km 38+500 al 38+600 LD, se detalla en rojo la zona que presenta condiciones muy similares a las del sector del deslizamiento.

7.8.2 Talud Lado Izquierdo km 38+600

En la figura 50 se observa la condición que presenta un tramo del talud del lado izquierdo en el sentido de circulación San José – Caldera. El manto para control de erosión colocado en el sitio, ha permanecido en el sitio por varios años y ha contribuido a reducir la tasa de deterioro superficial de este talud, sin embargo, ahora el manto se encuentra muy deteriorado y en muchos sectores ya no brinda una protección efectiva al talud.



Figura 50. Deterioro en el manto para control de erosión del talud LI en el km 38+600. Se observa gran cantidad de suelo y detritos al pie del talud, producto de la erosión superficial.

Tal como se observa, la erosión ha causado pérdida del suelo y las rocas que componen la brecha del talud. Es importante recordar que muchos eventos de deslizamiento son la culminación de procesos erosivos que no han sido atendidos en el momento adecuado. Se recomienda verificar la condición de estabilidad del talud mediante estudios integrales que permitan diseñar las obras

requeridas para garantizar la estabilidad y la protección superficial del talud, tomando en cuenta las implicaciones que el DAR, presente en esta zona, pueda tener en los materiales que sean considerados (ver la siguiente figura).

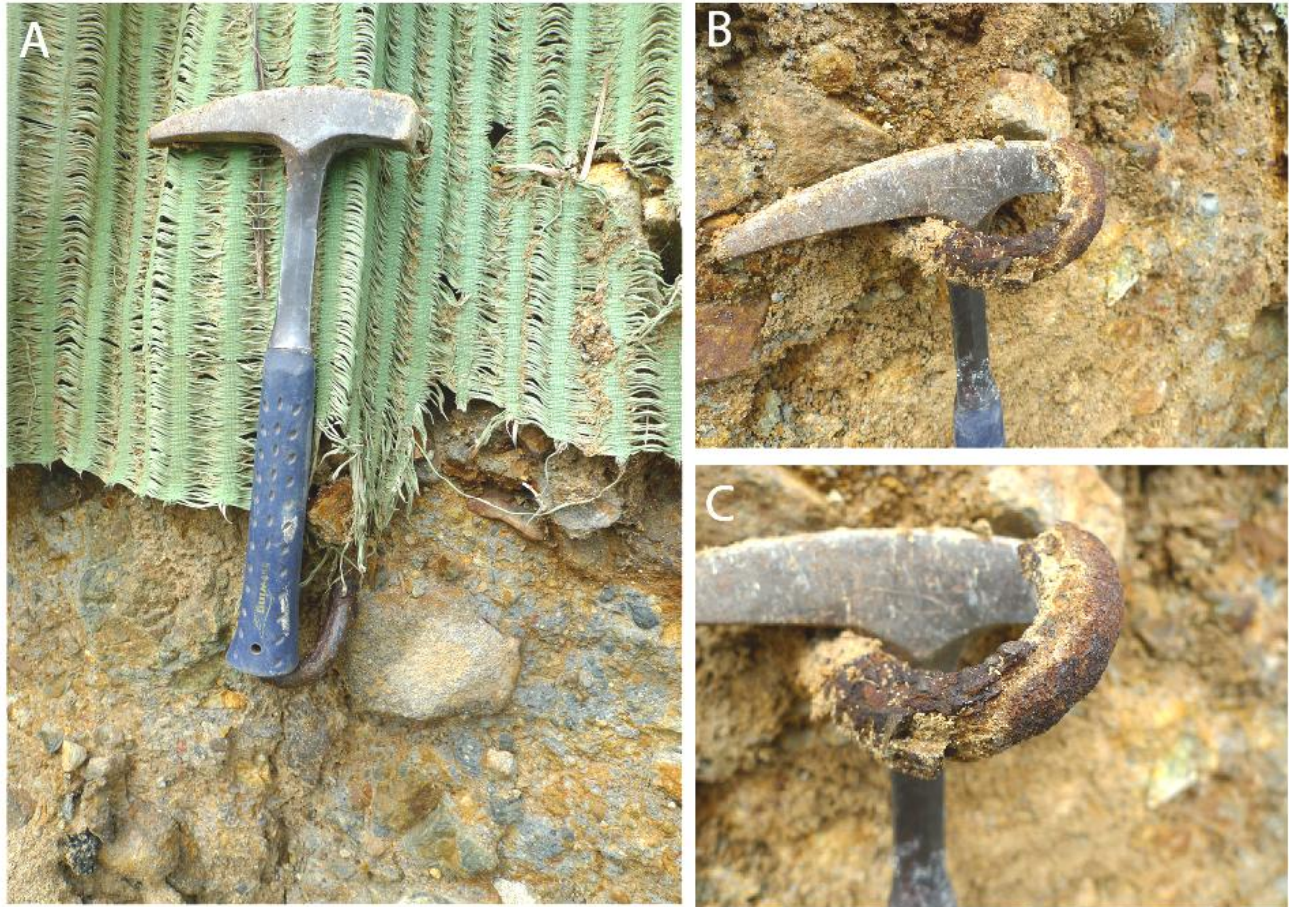


Figura 51. Efecto de DAR en pernos de acero colocados para anclar la malla de control de erosión en el talud LI.

7.9.3 Otros taludes con indicios de presentar DAR

En otros sitios de la RN-27 se han observado indicios de estar siendo afectados por DAR, similar a los estacionamientos 48+000 y 38+600. Las mayores afectaciones observadas, se dan en las estructuras de concreto y en el acero. Las cunetas al lado de la vía, presentan acumulación de óxidos de hierro y manganeso que son depositados por las aguas, posteriormente van perdiendo consistencia debido a la desintegración del material calcáreo al entrar en contacto con las aguas

ácidas. Lo mismo ocurre con las contracunetas colocadas en la parte superior de las bermas y taludes.

Merece especial atención el talud al lado derecho del km 47+000. Según se aprecia en la siguiente figura, el concreto lanzado empieza a presentar los mismos síntomas y la misma condición que presentaba el talud 38+600 hace aproximadamente 3 años.

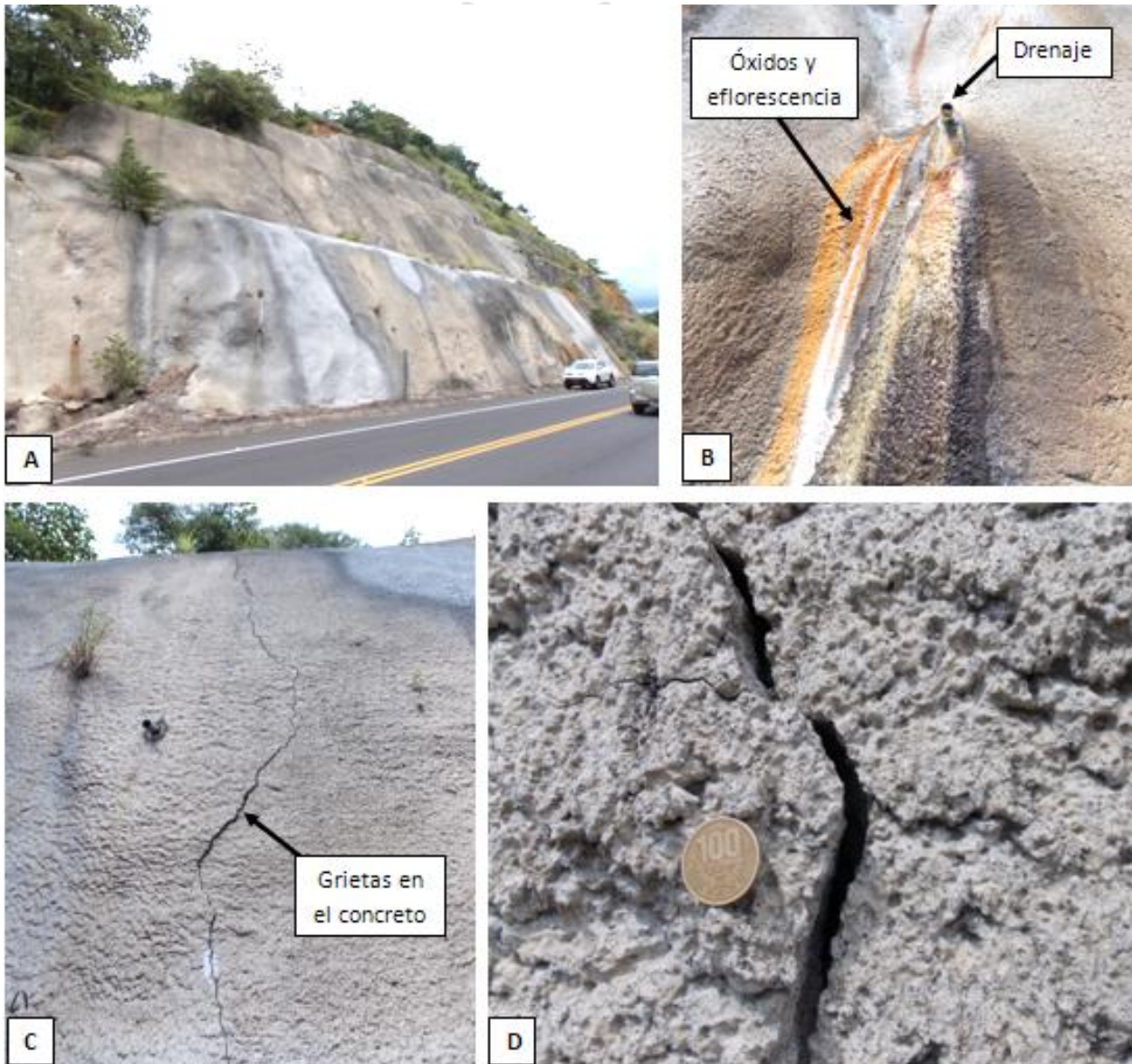


Figura 52. Deterioros observados en el talud del km 47+000, RN-27. A) Vista general de talud con concreto lanzado al LD. B) Salida de drenaje con presencia de óxidos y sales. C) Grietas de aproximadamente 6 m de longitud, observadas en el concreto lanzado. D) Detalle de grieta con ancho mayor a 1 cm.

Si no se toman acciones correctivas en el corto plazo, los mecanismos de deterioro identificados en los taludes con condiciones similares, hacen prever un avance en el deterioro de las obras de protección y estabilización. El deterioro en un grado avanzado provoca desprendimiento del concreto lanzado, junto con el suelo y las rocas que conforman los taludes en estos puntos de la carretera.

Considerando las condiciones ampliamente evidenciadas en este informe, se recomienda al Consejo Nacional de Concesiones solicitar al Concesionario definir y ejecutar acciones concretas para corregir o al menos mitigar de forma significativa el riesgo para los usuarios, así como el impacto en el nivel de servicio de la carretera concesionada.

Es necesario tomar en cuenta que estos procesos han sido reiteradamente evaluados y estudiados en diversos informes de este laboratorio, de ahí que, es criterio del LanammeUCR, que corresponde a la Administración procurar que se ejecuten acciones de corrección concretas, haciendo uso del marco normativo y contractual existente, estableciendo además los mecanismos de control pertinentes.

Así mismo, nuevamente se recomienda al Consejo Nacional de Concesiones solicitar al Concesionario estudios geológicos y geotécnicos específicos, para evaluar de forma técnica y objetiva las condiciones presentes en los taludes de estos puntos de la carretera.

8. OBSERVACIONES SOBRE LOS INFORMES DE LA CONCESIONARIA

En esta sección, inicialmente se presenta una línea de tiempo con los acontecimientos más importantes que han ocurrido con relación a taludes afectados por hidrotermalismo y/o drenaje ácido de rocas, de la Ruta Nacional 27. Esto con el fin de ubicar en el tiempo los acontecimientos, informes y recomendaciones del LanammeUCR y las respuestas de la Concesionaria.

Para construir esta línea de tiempo, se utilizaron referencias de artículos de periódicos, informes de la Asociación Costarricense de Geotecnia, artículos científicos, trabajos de graduación, reportes de LanammeUCR y los informes presentados por la Concesionaria ante el Consejo Nacional de Concesiones, donde exponen su criterio sobre el drenaje ácido de roca y la afectación que están generando en los taludes de la ruta.

Posteriormente se analizan detalladamente los informes presentados por la Concesionaria ante el Consejo Nacional de Concesiones, en los que dan su criterio sobre el proceso de drenaje ácido en los taludes de la Ruta Nacional 27. También se analiza el informe #3707-15, en el cual realizan un muestreo de núcleos del concreto de los taludes cubiertos con concreto lanzado y además comentan las condiciones específicas del talud 38+600, antes de que ocurriera el deslizamiento del 9 de agosto del presente año.

8.1 Línea de tiempo de la RN-27 y taludes con alteración hidrotermal y/o DAR.

09 de Enero 2008	Inician los trabajos de construcción y mejoramiento de las secciones San José-Ciudad Colón y Orotina-Caldera.
27 de Enero 2010	Inauguración del tramo entre Ciudad Colón y Orotina de la RN-27
15 de Febrero 2010	Ocurren deslizamientos en taludes del Km 47 de la RN-27 por lluvias, obligaron al cierre de la ruta. (La Nación, 2010)
16 de Abril 2010	Ocurren deslizamientos en taludes km 36 (Balsa Atenas) y km 50 (entrada a Orotina) de la RN-27 por lluvias, obligaron al cierre de la ruta (La Nación, 2010)
23 de Mayo 2010	Evento de caída de rocas de gran tamaño, que tuvo como consecuencia la muerte de un usuario de la ruta. (La Nación, 2010)
Mayo - 2010	Reporte de inspección geotécnica de los taludes de corte entre las estaciones 14+000 a 52+000 Asociación Costarricense de Geotecnia . Conclusiones del reporte: <ul style="list-style-type: none"> - El efecto de la alteración hidrotermal entre Atenas y el sector de Salitral ha producido zonas de debilidad con alta susceptibilidad a la erosión y a la inestabilidad, por lo que la probabilidad de que a corto y mediano plazo ocurran deslizamientos en esa zona es muy alta. - Km 47+960, taludes afectados por hidrotermalismo, falta de acciones para controlar inestabilidad y erosión. Falta de construcción de cunetas y la protección de la superficie de los taludes. - km 47, Hidrotermalismo generó deslizamiento que afectó vía férrea. - km 46+500 Talud interno afectado por hidrotermalismo. - Margen izquierda puente Concepción km 45+200, talud rocoso está afectado en menor grado por hidrotermalismo. - Sección entre km 44+200 – 45+200, afectación mayor del proceso de hidrotermalismo, no hay manejo de aguas ni bermas. - Caídos desde zona alta talud km 38+560, la mayor parte de la superficie del talud se protegió con concreto lanzado reforzado con malla electrosoldada y con tratamiento de subdrenajes, pero la parte superior se dejó sin protección o tratamiento. No se hace referencia a alteración hidrotermal en este punto.
2011	Informe de LanammeUCR (LM-PI-UE-008-2011): <ul style="list-style-type: none"> - km 38+500 Talud anteriormente recubierto de concreto lanzado y anclajes pasivos. Gran cantidad de agua bajando por el talud y cunetas obstruidas.

Línea de tiempo de eventos relacionados con hidrotermalismo y DAR en la RN-27 (cont.)

2012	<p>TFG J. Garro (2012):</p> <p>- km 38+500 La parte superior no presenta concreto lanzado, se desprende material. Grietas diagonales en la carpeta. Susceptibilidad alta. Problemática: Caída de material al espaldón y calzada. Recomendaciones: Talud derecho: evaluar opciones para intervenirlo de manera urgente. Talud izquierdo: intervención mediante protección superficial y/o movimiento de tierras. Dar prioridad a los trabajos antes del inicio de las lluvias para evitar mayor deterioro y prevenir lesiones a los usuarios de la vía.</p> <p>- km 48+000 Problemas de inestabilidad y erosión diferencial en los taludes, zona de hidrotermalismo. Susceptibilidad de alta a muy alta.</p>
Diciembre - 2012	<p>Artículo científico: Volcano-estratigrafía y tectónica del Valle Central occidental y las estribaciones de los Montes del Aguacate a lo largo de la Ruta 27, Costa Rica. Porras et al 2012.</p> <p>Sobre hidrotermalismo:</p> <p>- km 47+000 a 48+000, descripción de zona con profusa alteración hidrotermal y descripción de fallas tectónicas. Se menciona fuerte olor a azufre y recubrimiento de florescencias y masas minerales amarillentas verdosas y blanquecinas. Se reporta presencia de piritita y sulfatos ferrosos.</p>
Abril - 2013	<p>Informe de LanammeUCR 2013 (LM-UGERVN-005-2013):</p> <p>-km 38+500, Talud presenta fuerte coloración rojiza y lixiviados por fluidos en el talud original. La misma coloración en las cunetas. Concreto lanzado se desmorona fácilmente. Grietas importantes en el lado derecho del talud, el izquierdo presenta deterioro por acidez del suelo y agentes erosivos.</p>
Mayo - 2013	<p>Informe de LanammeUCR 2013 (LM-PI-UGERVN-007-2013):</p> <p>km 38+500, Talud presenta fuerte coloración rojiza y lixiviados por fluidos en el talud original. La misma coloración en las cunetas. Concreto lanzado se desmorona fácilmente. Grietas importantes en el lado derecho del talud, el izquierdo presenta deterioro por acidez del suelo y agentes erosivos.</p> <p>km 48+000 Alteración hidrotermal que producen rocas de carácter rocoso y residuo silíceo. Fallas y fracturas con rumbo predominante 15°N-25°E. Escurrimiento de agua con pH entre 3-4 que provocan cambios físicos en los suelos, vegetación y obras construidas. Mayor erosión y extensión de zonas afectadas. Taludes intervenidos con movimiento de tierras y drenajes superficiales, expuestos a agentes erosivos.</p>
Agosto de 2014	<p>Ocurren deslizamientos en taludes del Km 46 y 47 de la RN-27 por lluvias, obligaron al cierre de la ruta. (La Nación, 2014)</p>

Línea de tiempo de eventos relacionados con hidrotermalismo y DAR en la RN-27 (cont.)

Enero - 2015 **Informe de LanammeUCR 2015 (LM-PI-UGERVN-003-2015):** Los resultados de este informe demostraron que la afectación química que se está dando en ciertos taludes de la RN-27 va más allá de simple alteración hidrotermal y están más relacionados con la generación de "drenaje ácido de roca" (DAR). Se realizan pruebas de pH en pasta en dos taludes y se caracterizan otros sitios de interés de la RN-27. Se recomienda atender los problemas relacionados con DAR en los taludes que se compró su ocurrencia y que identifique el resto de taludes con posibilidad de presentar DAR.

- **km 38+500** Con base en las evidencias mineralógicas y texturales, el concreto lanzado deteriorado y las mediciones de pH del agua que salía del pie del talud, se sugiere que ese talud presenta DAR. Se recomienda hacer pruebas de pH en pasta.
- **km 45+600**, Se descarta presencia de DAR por pruebas de pH en pasta, sin embargo se menciona problemas de inestabilidad asociados a mal manejo de aguas superficiales y fracturación de rocas.
- **km 48+000** Se confirma presencia de DAR y afectación en cunetas, erosión e inestabilidad de taludes.

Marzo de 2015 **Presentación del Informe LM-PI-UGERVN-003-2015 del LanammeUCR ante CNC.** Se realiza una presentación oral ante el Consejo Nacional de Concesiones y se recomienda atender los problemas relacionados con DAR en los taludes que se comprobó su ocurrencia, y que se identifiquen el resto de taludes con posibilidad de presentar DAR.

18 de mayo 2014 **Informe de Concesionaria No. 2804-15.** Emiten criterio sobre el informe **LM-PI-UGERVN-003-2015** del LanammeUCR "Estudio de presencia de drenaje ácido de rocas (DAR) en taludes de la Ruta Nacional 27"- En el informe la Concesionaria no atribuye el DAR a la degradación de los materiales colocados, reconocen que "El DAR puede contribuir a que se produzca una degradación de las rocas producto de la erosión y degradación química"

- **km 38+500** "El hecho de que existan indicios en esta estación no significa necesariamente que haya DAR".- Atribuyen el agrietamiento del concreto en este estacionamiento a presiones hidrostáticas. - "En algunos taludes es estrictamente necesaria la utilización de obras de retención de concreto lanzado o anclajes (exista o no DAR). - "Se considera que el DAR podría causar una afectación sobre el concreto y los materiales, sin embargo el alcance del informe de LanammeUCR no permite concluir el efecto del DAR"
- **km 48+000** Mencionan la afectación en los taludes, dicen que es superficial, no menciona la afectación en las cunetas y sistemas de drenaje del sitio.

Línea de tiempo de eventos relacionados con hidrotermalismo y DAR en la RN-27 (cont.)

Junio - 2015	Deslizamiento en km 45+600 después del puente sobre la Quebrada Concepción. Este sitio fue analizado en el informe LM-PI-UGERVN-003-2015 de LanammeUCR, en el que se identifican problemas de inestabilidad asociados a mal manejo de aguas y fracturación de rocas. Deslizamiento disparado por lluvias que cayeron entre 2 - 4 pm del 4 de junio 2015. (La Nación, 2015)
16 de Julio de 2015	<p>Informe de Concesionaria No. 3707-15</p> <ul style="list-style-type: none"> - Presentan resultados de pruebas de resistencia realizados en núcleos de concreto lanzado extraídos de varios taludes de la RN-27. - El promedio de resistencia obtenido para los 15 núcleos de concreto ensayados por el Consultor de la Concesionaria fue de 358 kg/cm². -Concluyen que los espesores, la resistencia y el peso unitario son apropiados para las aplicaciones de concreto lanzado. - Concluyen “no se ha podido determinar que este fenómeno haya afectado las características de resistencia del concreto”, los espesores o el peso unitario típico de este material. - Indican que no parece existir información suficiente para indicar que el deterioro debido al DAR sea un proceso acelerado tal y como se indica en el informe del LANAMME. - En relación con el concreto lanzado del km 38+600 indican que este no presenta mayores variaciones en las propiedades evaluadas, según los resultados del trabajo que realizaron. -Atribuyen la aparición de grietas en el concreto del km 38+600 a la necesidad de disponer de una mayor cantidad de obras que evacúen el agua y no a efectos asociados al DAR.
9 de Agosto de 2015	Deslizamiento en km 38+600. Colapso de la parte media y superior del talud que estaba cubierto por concreto lanzado. Se bloquea un carril. Deslizamiento disparado por lluvias (La Nación 2015). Se inicia con la remoción del concreto lanzado que quedó en voladizo.
Octubre de 2015	Presente informe: LanammeUCR, demuestra con pruebas de pH en pasta, evidencias mineralógicas y de pH de aguas la ocurrencia de DAR en talud 38+600. Se estudian en detalle los deterioros en el concreto lanzado y el acero de las mallas electrosoldadas y en los anclajes, producto del DAR que se genera en este sitio.

8.2 Observaciones sobre el primer informe de la Concesionaria

Mediante el oficio OF-UGERVN-005-2015 del 3 de agosto del 2015, el LanammeUCR solicitó al CNC información relativa a las labores de reparación y mantenimiento, en ejecución o programadas, para la intervención de los taludes afectados por deslizamientos, deterioros y desprendimiento del concreto lanzado, en la Ruta Nacional No.27.

La respuesta al oficio antes citado fue recibida en LanammeUCR el pasado 3 de setiembre del 2015, mediante el oficio CNC-ST-OF-2015-0622, emitido por la Secretaría Técnica del CNC. En este oficio se adjunta la información que el Concesionario GLOBALVÍA presentó al CNC, en respuesta a la solicitud realizada por el LanammeUCR sobre este particular.

La información recibida incluye el informe identificado con el número **2804-15**, preparado por la empresa Consultora INSUMA S.A., por solicitud de la Concesionaria GLOBALVÍA Ruta 27. La empresa INSUMA S.A. realiza el informe con el fin de emitir criterio sobre el informe LM-PI-UGERVN-003-2015, del LanammeUCR.

Luego de analizar el informe preparado por el Consultor de la Concesionaria, se presentan las siguientes observaciones.

Sobre el origen de la presencia de DAR en la RN-27

En el informe No. 2804-15, página No.1, dice lo siguiente: *“El drenaje ácido de rocas es una condición natural que no es atribuible exclusivamente a la construcción de obras de infraestructura. Es un fenómeno que puede suceder en el medio ambiente, sin necesidad de que exista algún tipo de actividad humana asociada”.*

Con respecto a esta afirmación se aclara lo siguiente: El drenaje ácido de roca, es un proceso químico que incluye reacciones de descomposición de sulfuros en presencia de oxígeno y agua, que también pueden ser explicadas y reproducidas en un laboratorio. Aunque el DAR puede ocurrir en el

medio ambiente sin necesidad de actividad humana, no es lo usual y se asocia más a actividades humanas como: Minería a cielo abierto, minería subterránea y destapes de taludes como los que se dieron en los sitios en los que se ha demostrado su presencia en la RN-27.

Hay una asociación directa entre la ocurrencia de DAR y los cortes que se hicieron para el trazado de la ruta, en taludes con gran cantidad de sulfuros. Adicionalmente, tal como se indicó en el informe LM-PI-UGERVN-003-2015 del LanammeUCR, “el DAR es un proceso difícil de predecir y prevenir, sin embargo existen técnicas para determinar el potencial de generación de DAR en una zona antes de realizar los cortes y destapes”.

Aunque los factores como humedad y presencia de oxígeno no son modificados por la obra, la exposición de los materiales con potencial de generar DAR ante estos factores sí es generada por la obra que se construyó, en este caso el corte de los taludes de la RN-27. Por lo tanto, sí es atribuible la generación de DAR a la construcción de la carretera.

Continuando con el informe del Consultor, en la página 1 se refieren a las condiciones geológicas que han creado el escenario para que se presente DAR en algunos sitios de la carretera. En este sentido indican: *“Los comentarios anteriores deben ser tomados en cuenta puesto que son las condiciones naturales de la zona por la cual se delimitó el trazado de la Carretera. A lo largo de este trazado ya se habían dado procesos anteriores que pudieron haber incidido en que desde mucho antes se produjera el fenómeno del DAR. Uno de estos procesos es la construcción de los puentes Concepción y Salitral, obras que se construyeron unos 10 años antes a que estuviera en marcha la operación de la Carretera.”*

Tal como el Consultor indica, las condiciones que generan DAR son producto de procesos geológicos que han estado presentes en la zona mucho antes de la construcción de la carretera, y son además detectables mediante estudios geológicos. Por lo tanto, el DAR y sus consecuencias no son eventos de fuerza mayor, es decir, son hechos que se pueden evitar y se pueden prever.

En el mismo párrafo reconocen que los procesos constructivos pueden incidir en la generación de DAR, hecho que reafirma lo establecido por el LanammeUCR en este informe.

Sobre la extensión de DAR y el caso del talud del km 45+600

En el mismo informe (No. 2804-15), entregado al CNC por parte de la Concesionaria, página No. 2, se habla sobre la extensión del DAR y como en el km 45+600 no hay presencia de este proceso.

Efectivamente, en el informe LM-PI-UGERVN-003-2015 que preparó y presentó el LanammeUCR, en enero de este año 2015, se indicó que la presencia de DAR en taludes de la RN-27 se determinó con base en pruebas de pH en pasta, y que los resultados de estas pruebas determinaron que en el talud del km 45+600 no presenta DAR.

Sin embargo, se hicieron observaciones sobre los problemas de estabilidad del sitio y su origen por diferentes motivos. Estas recomendaciones no fueron consideradas en el informe contratado por la Concesionaria, ni se analizaron los otros problemas de inestabilidad que presenta el sitio.

Cabe aclarar que en los informes preparados por el LanammeUCR sobre este tema en particular, no se han generalizado los problemas de estabilidad de la carretera a efectos derivados del proceso de Drenaje Ácido de Roca. Por el contrario, las condiciones y los mecanismos de deterioro han sido estudiados de forma técnica y objetiva, en los sitios donde las pruebas realizadas han demostrado la ocurrencia de este proceso.

Se cita a continuación parte del texto del informe LM-PI-UGERVN-003-2015, presentado en enero del 2015, sobre la condición del talud del km 45+600.

“Los problemas de estabilidad del macizo rocoso que se están dando en este sitio específico, no están directamente relacionados con DAR. Otras variables como: las pendientes tan pronunciadas (en algunos casos verticales), las rocas densamente fracturadas, así como la gran cantidad de agua que atraviesa y baja por ellas son posiblemente las principales razones que influyen en la generación de problemas de estabilidad y que se traducen en deslizamientos de tipo caídas de bloques”.

A pesar de las múltiples recomendaciones sobre las condiciones de este sitio específico, presentadas en el informe del LanammeUCR antes citado, la Concesionaria a la fecha no ha realizado ninguna intervención que respondiera a las condiciones geotécnicas que se describieron para este talud, poniendo en riesgo a los usuarios de la ruta.

Seis meses después del informe del LanammeUCR, el 3 de junio del presente año, con las primeras lluvias de la estación húmeda, en este punto (km 45+600) se produjo un deslizamiento importante, con caída de material que cubrió los dos carriles de la carretera (Figura 53).

Nuevamente se recomienda al Consejo Nacional de Concesiones solicitar al Concesionario definir y ejecutar acciones concretas para corregir o al menos mitigar de forma significativa el riesgo para los usuarios y el impacto en el nivel de servicio de la carretera concesionada, haciendo uso del marco normativo y contractual existente. Se recomienda poner especial atención a las condiciones de la parte alta de la ladera y la afectación que pueda tener la línea del ferrocarril que pasa por la zona.



Figura 53. Deslizamiento tipo caída de bloques en km 45+600, generado por las primeras lluvias del 2015. Imagen tomada de Diario Extra, 4 de junio del 2015.

Sobre la ocurrencia de DAR en la estación 38+500

En el informe No.2804-15 presentado por la Concesionaria, página No. 2, dice lo siguiente: *“Adicionalmente, queda evidenciado que el hecho que existan indicios de DAR no se significa que se esté presentando este fenómeno. Esto es válido para la estación 38+500, donde se pueden hacer estudios específicos (si es que lo ameritan) para determinar si existe DAR. El hecho de que existan indicios en esta estación no significa necesariamente que haya DAR”*.

Tal como se demuestra en este informe, en el tramo 38+500 a 38+700 de la Ruta Nacional No.27 se está presentando DAR, además, se comprueba que el DAR ha afectado química y físicamente el concreto lanzado y el acero de refuerzo, al punto de hacerlos colapsar en el deslizamiento del 9 de agosto del 2015, generando un peligro manifiesto para los usuarios.

De acuerdo con la información remitida al LanammeUCR, la empresa Consultora que realizó el informe No.2804-15 de mayo del 2015, no consideró las evidencias que indicaban la generación de DAR en su estudio, tampoco realizó pruebas de pH en pasta, aún cuando sí lo ameritaba (por el deterioro que presentaba en ese momento) y además se había recomendado en el informe LM-PI-UGERVN-003-2015 del LanammeUCR, en enero del 2015.

Asimismo, con base en el informe remitido al LanammeUCR, el Consultor del Concesionario desestimó los indicios que revelaban la generación de DAR. El Concesionario no presentó estudios que permitieran comprobar o descartar esta situación. Una caracterización completa de este sitio hubiera sido muy oportuna, y posiblemente se habría contado con información valiosa para valorar las condiciones de la obra que provocaron el deslizamiento de agosto del 2015. Sin embargo, esta ventana de tiempo no se aprovechó.

Adicionalmente, la Supervisora del Proyecto, la empresa Consorcio Getinsa-Gabinete, en el informe CGG S 001/150817 con fecha del 17 de agosto del 2015, se refiere específicamente sobre las intervenciones que el Concesionario ha realizado en este tramo de la carretera. En la sección 4.3 del informe citado la Supervisora indica lo siguiente: *“Se deberá confirmar el correcto funcionamiento de la solución propuesta, descartando asimismo la existencia de DAR. En caso de confirmarse la existencia de DAR, se deberían establecer medidas para su control, verificando en este caso que no se ha producido deterioro de los elementos de contención existentes en el desmonte, o*

planteamiento de diseño alternativo que no requiera la disposición de elementos externos de refuerzo que puedan alternarse por la existencia de DAR." (El subrayado no es del original).

Considerando que en el presente informe se comprueba la presencia de Drenaje Ácido de Roca en el km 38+600 de la RN-27, así como la afectación que ha producido en el concreto y el acero de refuerzo, se considera prudente acatar la recomendación que hace la Supervisora en su informe, en cuanto a la necesidad de establecer medidas alternativas para evitar la alteración de los materiales por efecto del DAR, tal como ha sido reiteradamente sugerido por el LanammeUCR.

Se recomienda al Consejo Nacional de Concesiones solicitar a la Concesionaria diseñar e implementar soluciones para el km 38+600 que respondan a las condiciones del sitio y su afectación por DAR, además de realizar los trabajos de caracterización geoquímica en todos los sitios sugeridos por el LanammeUCR, de forma que se logre comprobar o descartar la presencia de DAR en otros sitios de la Ruta 27. Esto con el fin de no repetir las omisiones que pueden provocar incluso la pérdida de vidas humanas.

Sobre la contribución del DAR en la degradación de las rocas y el concreto

Continuando con el análisis del informe No.2804-15 remitido al LanammeUCR por el CNC, en la página No.3 dice lo siguiente: "*el DAR puede contribuir a que se produzca una degradación de las rocas producto de la erosión y degradación química que podría sufrir. Esto, sin embargo, también puede suceder para el caso donde el drenaje no es ácido ya que el agua y la intemperie puede generar los mismos efectos*".

La primera parte de esta afirmación es correcta, el DAR efectivamente contribuye a la degradación de las rocas. Sin embargo, el enfoque de la segunda afirmación no es compartido por el LanammeUCR por las razones que se presentan a continuación.

La solubilidad de los hidróxidos ferrosos y de titanio y el carbonato cálcico están influenciados por el pH de las aguas (Loughnan, 1969). La solubilidad de estos compuestos aumenta conforme el pH sea más ácido. Mayor solubilidad propicia mayor erosión hídrica, también la oxidación de sulfuros da lugar a que las aguas alcancen una acidez muy elevada y aumenten la reacción química.

Simplemente no se puede esperar una misma intensidad en la reacción química que genere meteorización y posteriormente erosión hídrica a la intemperie en un sitio donde se está dando DAR y uno donde no ocurre este proceso, debido a que sin DAR la solubilidad de los compuestos antes mencionados no se altera.

La intensidad de la meteorización química y el tiempo que tarda en afectar y disminuir las propiedades físicas de la roca o el concreto lanzado no será igual en un sitio con DAR y uno sin este proceso, siendo siempre mayor la intensidad y más rápida la degradación en un sitio con DAR.

Se recomienda al Consejo Nacional de Concesiones solicitar al Concesionario que las empresas consultoras que van a trabajar en estos sitios tengan amplios conocimientos en el tema de DAR, y que puedan como mínimo reconocer las diferencias básicas de intensidad y duración en una reacción química sobre las rocas que incluya ácidos y un catalizador. De lo contrario se retarda la búsqueda de la solución definitiva y la atención del problema.

Sobre el talud del km 48+000

Pese a que en este sitio no existen soluciones de estabilización mediante concreto lanzado, pernos anclajes, etc., como se menciona en el informe No.2804-15, Página No.3 del Consultor del Concesionario. En este sitio si hay cunetas de concreto que fueron colocadas para el manejo de las aguas superficiales.

Tal como se corrobora en este informe, existe una afectación directa del ácido sulfúrico en todas las estructuras que tengan componente calcáreo. Por lo tanto, las cunetas de este talud están expuestas a condiciones que aceleran su deterioro impidiendo un adecuado manejo de aguas superficiales y esto a su vez está influyendo negativamente en el deterioro y la estabilidad de los taludes, generando una meteorización química intensa de los materiales originales del talud, y posteriormente erosión hídrica que derivan en pequeños colapsos de material.

Con el tiempo, una profundización de la zona afectada por DAR producirá planos de falla más profundos y deslizamientos más grandes en este sitio. En la figura 54, se muestra el talud LD del km

48+000, donde se observa la evidente afectación del DAR en la cunetas y bajantes que propician la erosión del talud y aumentan su inestabilidad.

Se debe tener presente que muchos deslizamientos son la culminación de procesos erosivos que no han sido intervenidos a tiempo ni de forma adecuada. Por lo tanto, no se puede desdeñar el efecto futuro que tendrá el deterioro por erosión que desde hace años viene afectando al talud del km 48+000, tal y como lo hace el Consultor INSUMA S.A. en su informe.

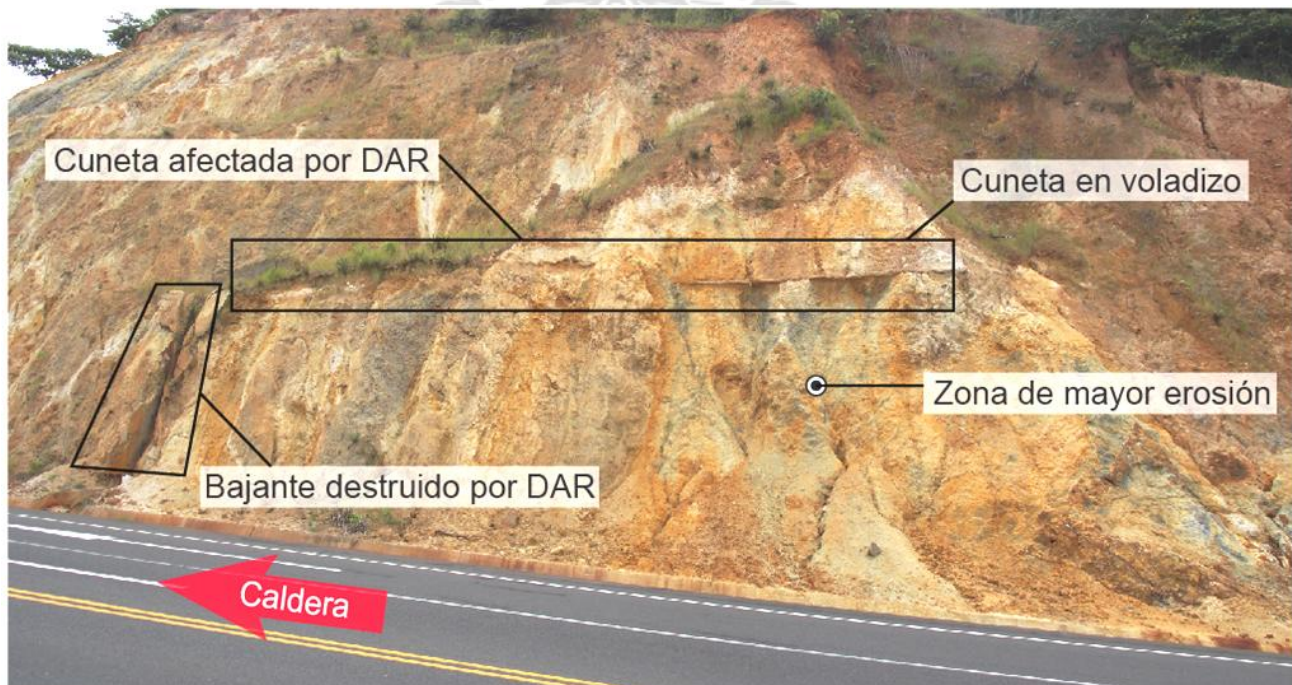


Figura 54. Afectación por Drenaje Ácido de Roca en las cunetas y los bajantes del talud del km 48+000. El efecto que produce el DAR en el concreto destruye las cunetas provocando que los sistemas de drenaje de aguas superficiales dejen de realizar su función, lo que favorece la erosión del talud, provoca pérdida de suelos e influye negativamente en la estabilidad de sitio en el mediano y el largo plazo.

Además de los taludes afectados por DAR a los lados de la carretera en el km 48+000, hay dos sitios más en este sector a los que se les debe prestar más atención, debido a que deben estar siendo afectados por el DAR.

Se trata del puente sobre el río Salitral y los botaderos localizados tanto al oeste como al sur del talud LI, según se aprecian en la siguiente figura.



Figura 55. Se muestran los taludes del km 48+000 que presentan DAR, los botaderos y el puente sobre el río Salitral.

Para este sitio se recomienda considerar lo siguiente: Determinar cuál es el estado actual de las pilas, bastiones y otras estructuras de concreto y acero del puente sobre el río Salitral y determinar si han sido afectadas por el DAR. Determinar cuál es el nivel de pH de los lixiviados que están saliendo de los botaderos. También implementar un programa de monitoreo constante durante un periodo de tiempo de al menos un año donde se hagan mediciones de pH de las aguas de río Salitral en la parte superior de la cuenca y en el mismo sitio del puente.

En estos sitios, además de estar generando lixiviados ácidos que pueden estar afectando las fundaciones del puente sobre el río Salitral, también pueden estar propiciando una acidificación mayor de las aguas del río Salitral, lo que podría generar un problema ambiental aguas abajo.

Estas recomendaciones han sido emitidas por el LanammeUCR al Consejo Nacional de Concesiones desde el año 2013, sin que se evidencie ningún tipo de interés de estudiar el problema, o de resolver las afectaciones que se pueden estar presentando producto de la ausencia total de un manejo

adecuado de estos botaderos (Informes INF-PITRA-001-2013, LM-PI-UGERVN-007-2013, INF-PI-UGERVN-005-2014).

Sobre los límites de afectación de una zona con DAR

En este informe (No.2804-15) presentado por el Concesionario y remitido al LanammeUCR por parte del CNC, en la página No.4 se indica: *“Los taludes donde se han construido obras de estabilización ancladas presentan un comportamiento aceptable y seguro”* a pesar de ser sitios cercanos a las zonas donde podría darse DAR y dan ejemplos como 40+800, 46+400, 46+600, 46+800.

La afirmación anterior fue realizada por el Consultor en mayo del 2015 y se omite mencionar el talud del km 45+600, en el que también se había colocado concreto lanzado y el cual falló en junio del 2015. El material que cayó bloqueó los dos carriles de la carretera. Por lo que la afirmación de que el comportamiento de las obras de estabilización ancladas es *“aceptable y seguro”* no coincide con la realidad de los hechos.

Adicionalmente, aunque en el km 48+000 hay presencia de DAR, en el km 48+600 después del puente sobre el río Salitral no hay indicios de DAR ni de alteración hidrotermal, mientras que en el km 45 donde se encontró otra estructura tectónica hay muchas evidencias mineralógicas, texturales y de afectación al concreto que sugieren la presencia de DAR, sin embargo las pruebas realizadas por este Laboratorio concluyen que en este sitio no se presenta DAR.

Por lo tanto, es con evidencias fidedignas y pruebas de pH que se puede descartar o confirmar la ocurrencias de DAR en un sitio, aún cuando esté junto a uno que ya haya sido confirmado o descartado. Es por esta razón que recomendamos caracterizar de forma técnica y objetiva los taludes que presenten evidencias de Drenaje Ácido, antes de confirmar o descartar la ocurrencia de este proceso.

Sobre el uso de concreto lanzado para obras de retención en sitios con o sin DAR

En el informe No.2804-15 página No.4, se dice lo siguiente: *“Se debe tener en consideración que el derecho de la vía de la Carretera está fijado y por lo tanto en algunos taludes es estrictamente necesaria la utilización de obras de retención de concreto lanzado o anclajes (exista o no DAR)”*.

Como se ha demostrado en este informe mediante pruebas científicas, análisis cualitativos y cuantitativos, el concreto lanzado con malla electrosoldada y los anclajes de acero no son compatibles con el proceso de DAR, debido al deterioro acelerado que produce. Mucho menos en condiciones tan extremas como las que se han medido en varios taludes de la RN-27.

Para el LanammeUCR es técnicamente incorrecto colocar concreto lanzado y anclajes de acero en un sitio donde ya estos materiales han colapsado por efecto del DAR (km 38+600 por ejemplo), esto es reconstruir la vulnerabilidad y volver a poner en peligro a los usuarios, al colocar materiales que eventualmente van a colapsar.

Simplemente no se pueden esperar resultados diferentes si se siguen construyendo las mismas obras que ya han fracasado. Cuando se dice que algo es estrictamente necesario, como lo hace la empresa Consultora en su informe, deberían haber probado y agotado todas las medidas y técnicas disponibles para enfrentarse al problema de fondo, que en este caso es el proceso de DAR. Sin embargo considerando la información remitida al LanammeUCR se ha evidenciado que este no es el caso.

La documentación recibida junto con el oficio supra citado del Consejo Nacional de Concesiones, incluyó el informe 3713-15, preparado por la empresa consultora INSUMA S.A., con fecha del 16 de julio del 2015. En la página 16 de dicho informe presentan la evaluación del talud de la estación 38+600. Recomiendan específicamente colocar drenajes horizontales, **malla electrosoldada y una nueva capa de concreto lanzado**.

Es criterio del LanammeUCR que sugerir utilizar concreto lanzado y anclajes en zonas con DAR y no buscar una solución real al problema de fondo que influye en su deterioro, se aleja de las buenas prácticas de la ingeniería geológica.

Recomendamos al Consejo Nacional de Concesiones solicitar al Concesionario buscar una solución que logre disminuir de forma sustancial el riesgo a los usuarios. Colocar concreto lanzado con anclajes de acero como se ha venido haciendo no es una solución aceptable para sitios con DAR.

Sobre el proceso de DAR y su efecto en la vida útil de las obras construidas

Continuando con el informe No.2804-15, en la página No.4 dice lo siguiente en referencia al informe LM-PI-UGERVN-003-2015 del LanammeUCR: *"Así pues no es posible cuantificar el grado de alteración y/o corrosión que sufren estos materiales y si existe un efecto significativo en la vida útil de la obra construida"*

Como ha sido demostrado en el presente informe, el acero colocado en sitios con DAR sufre de oxidación y corrosión intensa. Se observaron reducciones en los diámetros del acero, tanto en la malla electrosoldada como en las varillas de acero, también se cuantificó una reducción de masa de este tipo de varilla de hasta 37.7 %. En el concreto lanzado la afectación es intensa en la zona que está expuesta a los materiales del talud, consumiendo el contenido calcáreo y facilitando la infiltración de agua ácida hasta el acero de la malla y desplazando agregados finos generando porosidad en el concreto.

Los anclajes y el concreto lanzado fueron colocados en el talud 38+600 entre el año 2009 y el 2010, en el 2013 un tramo tuvo que ser reparado y un sector colapsó en el deslizamiento de agosto del 2015, esto significa que su vida útil fue a lo sumo de seis años. Para una obra de contención en una vía estratégica para el país y con un tránsito elevado este es un periodo de vida útil inaceptable que se aleja de las buenas prácticas de la ingeniería.

Por lo tanto, tomando en cuenta el proceso de Drenaje Ácido de Roca que está efectivamente presente en el talud, y su relación comprobada en el deterioro del concreto y el acero de refuerzo, se puede concluir que el DAR del talud en el km 38+600 ha sido un factor determinante en la reducción de la vida útil de la obra de protección y estabilización ahí construida.

Recomendamos al Consejo Nacional de Concesiones exigir a la Concesionaría que se diseñen y construyan obras adaptadas para resistir las condiciones adversas propias de este sitio y los otros

sitios que presenten DAR, con el fin de no poner en riesgo la seguridad de los usuarios y lograr obras civiles con la calidad esperada para una carretera en concesión.

Sobre las intervenciones realizadas en este tramo de la carretera

En la página No.5 de este mismo informe (No.2804-15), se dice lo siguiente: *“se debe tener en cuenta que se ha hecho un esfuerzo por ir mejorando las condiciones de estabilidad de las zonas donde existe alteración hidrotermal (exista o no DAR). En el caso de la estación 38+500, por ejemplo se han instalado anclajes que anteriormente no existían, se ha incrementado la cantidad de drenajes sub horizontales y se han utilizado mallas de alta resistencia como alternativa al concreto lanzado.”*

Como se demuestra en el presente informe, el tramo que va desde el km 38+500 al 38+700 presenta DAR y hay afectación directa tanto en concreto lanzado como en los anclajes de acero y en los drenajes sub horizontales. Los nuevos anclajes que se coloquen en este sitio estarán expuestos a las mismas condiciones agresivas y al deterioro acelerado. El concreto lanzado igualmente será objeto de deterioro prematuro y eventualmente se convertirá en un peligro para los usuarios de la vía.

Con respecto a la instalación de drenajes sub horizontales, en el presente informe también se demostró que estos se saturan y dejan de funcionar por la acumulación de sulfatos generados por el DAR, originando acumulación de agua ácida que afecta la estabilidad de la obra. Una mayor cantidad de drenajes por si solos no resuelven el problema de fondo, la solución definitiva debe ser integral.

La reparación de las obras que han sido afectadas por DAR deben ser soluciones adecuadas para ambientes con las características generadas por el DAR. No es viable aceptar reparaciones que han fallado y que van a volver a fallar. Los esfuerzos por mejorar las condiciones de estabilidad que menciona la empresa Consultora son insuficientes cuando no se incluyen análisis completos de ingeniería geológica e investigación sobre soluciones efectivas para mitigar los efectos del DAR.

8.3 Observaciones sobre el segundo informe de la Concesionaria

La documentación recibida junto con el oficio CNC-ST-OF-2015-0622 del Consejo Nacional de Concesiones, incluye el informe 3707-15 con fecha del 16 de julio del 2015, realizado por el Consultor

INSUMA S.A. para GLOBALVÍA. El informe responde al estudio contratado con el siguiente objetivo: “determinar las características generales del concreto que se ha colocado en los distintos taludes de la sección 2 de la Ruta 27.” (INSUMA INF 3107-15).

En el estudio mencionado, el Consultor extrajo 22 núcleos de concreto de un total de 8 taludes. Estos taludes se localizan entre los kilómetros 36+100 y 47+000 de la ruta. De las muestras obtenidas, 15 fueron seleccionadas por el Consultor para realizar el ensayo de resistencia a la compresión simple y medición del peso unitario.

En la siguiente figura se muestra el cuadro 2 del informe del Consultor de GLOBALVIA, con los resultados de las pruebas realizadas a los núcleos de concreto.

Cuadro 2: Resultados de los ensayos realizados a los núcleos de concreto

Núcleo No.	Talud	Estación	Espesor [cm]	Peso Unitario [t/m ³]	Resistencia [kg/cm ²]
1	36+100	36+100	8.0	-	-
2	38+000	38+150	28.0	2.25	571
3		38+180	21.0	2.25	344
4	38+600	38+515	13.0	-	-
5		38+570	13.0	2.23	365
6		38+605	12.5	2.25	334
7		38+665	7.0	-	-
8	44+100	44+185	22.0	2.26	385
9		44+230	13.0	2.22	296
10	44+400	44+356	17.0	2.22	333
11		44+376	17.5	2.24	381
12		44+400	13.0	2.25	347
13	45+150	45+155	17.0	-	-
14	46+250	46+250 ^(*)	6.5	-	-
15		46+325 ^(*)	11.5	-	-
16		46+390	14.0	2.28	288
17		46+410	14.5	2.22	348
18		46+440	19.5	2.25	387
19		46+470	19.0	2.27	375
20	47+000	46+970	19.0	2.14	248
21		46+995	7.0	-	-
22		47+015	19.0	2.22	377

(*) Núcleos extraídos de la parte alta del talud

Figura 56. Cuadro de resultados presentado en la pág. 3 del informe No.3707 de INSUMA S.A. en julio 2015.

Luego de analizar estos resultados se presentan las siguientes observaciones: La prueba para evaluar la resistencia a la compresión simple de núcleos de concreto lanzado está normada por la

ASTM, mediante la norma C1604/C1604M – 05 (Reapproved 2012) “*Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores of Shotcrete*”. En el apartado 8.8.1 de esta norma, se indica que si la relación entre la longitud y el diámetro del núcleo es menor a 1,75, la resistencia obtenida de la prueba debe ser corregida por un factor que reduce la resistencia gradualmente hasta en un 23%.

Según se observa en la figura anterior, siete núcleos tienen una longitud (indicada como espesor en el cuadro) menor a 17,5 cm, por lo que los resultados de resistencia de estos núcleos debieron ser corregidos por el Consultor, antes de presentar los resultados que se observan en el cuadro.

En el informe en cuestión (No.3707-15) no se indica si esta corrección fue aplicada a los valores reportados en el cuadro 2, por lo que no es posible para este Laboratorio determinar si dicha corrección fue realizada o no. En el caso de que la corrección indicada en la norma ASTM citada no fue realizada, la resistencia de los núcleos 5, 6, 9, 10, 11, 12, 16 y 17 no corresponde con un valor normado de resistencia del concreto.

Como parte del estudio realizado para este informe, el día 21 de setiembre del 2015, funcionarios del LanammeUCR inspeccionaron 19 de los 22 sitios en los que INSUMA S.A. indica que fueron extraídos los núcleos de concreto.

En cada sitio se evaluó la condición general del concreto en la zona de extracción, la evidencia de Drenaje Ácido de Rocas en el talud, la profundidad alcanzada con la perforación, la extracción completa o no de todo el espesor de concreto y la presencia de varillas de refuerzo en la superficie de corte, y, por lo tanto, en el núcleo extraído por el Consultor de GLOBALVIA.

A continuación, se presentan varias figuras con las fotografías de los sitios de los cuales el Consultor extrajo los núcleos de concreto, se presenta también un detalle del interior del orificio generado por la extracción de los núcleos.



Figura 57. Sitio de extracción del núcleo No.3., km 38+180. A) Vista general del talud y del punto de extracción. B) Interior de la perforación, se detalla el corte en las varillas que fueron extraídas como parte del núcleo de concreto.



Figura 58. Sitio de extracción del núcleo No.4., km 38+515. A) Vista general del talud y del punto de la extracción. Al lado derecho del sitio de extracción se observan patinas de hierro y sales sobre el concreto. B) Interior de la perforación, se detalla el corte de las varillas que fueron extraídas como parte del núcleo de concreto.



Figura 59. Sitio de extracción del núcleo No.5., km 38+570. A) Vista general del talud y del punto de la extracción. B) Interior de la perforación, se detalla el corte de las varillas que fueron extraídas como parte del núcleo de concreto.



Figura 60. Sitio de extracción del núcleo No.8., km 44+185. A) Vista general del talud y del punto de la extracción. B) Interior de la perforación, se detalla el corte de las varillas que fueron extraídas como parte del núcleo de concreto.



Figura 61. Sitio de extracción del núcleo No.9., km 44+230. A) Vista general del talud y del punto de la extracción. B) Interior de la perforación, se detalla el corte de las varillas que fueron extraídas como parte del núcleo de concreto.



Figura 62. Sitio de extracción del núcleo No.10., km 44+356. A) Vista general del talud y del punto de la extracción. B) Interior de la perforación, se detalla el corte de las varillas que fueron extraídas como parte del núcleo de concreto.

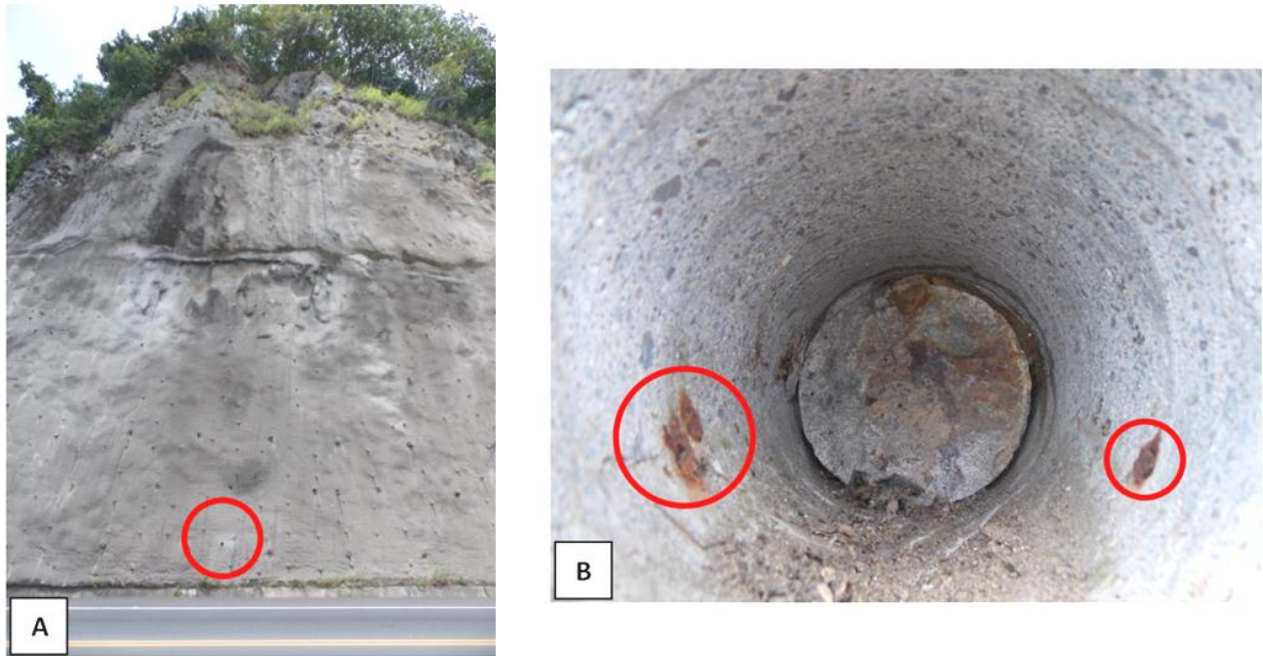


Figura 63. Sitio de extracción del núcleo No.11., km 44+376. A) Vista general del talud y del punto de la extracción. B) Interior de la perforación, se detalla el corte de las varillas que fueron extraídas como parte del núcleo de concreto.



Figura 64. Sitio de extracción del núcleo No.16., km 46+390. A) Vista general del talud y del punto de la extracción. B) Interior de la perforación, se detalla el corte de las varillas que fueron extraídas como parte del núcleo de concreto.



Figura 65. Sitio de extracción del núcleo No.18., km 46+440. A) Vista general del talud y del punto de la extracción. B) Interior de la perforación, se detalla el corte de las varillas que fueron extraídas como parte del núcleo de concreto.



Figura 66. Sitio de extracción del núcleo No.19., km 46+470. A) Vista general del talud y del punto de la extracción. B) Interior de la perforación, se detalla el corte de las varillas que fueron extraídas como parte del núcleo de concreto.



Figura 67. Sitio de extracción del núcleo No.20., km 46+970. A) Vista general del talud y del punto de la extracción. B) Interior de la perforación, se detalla el corte de las varillas que fueron extraídas como parte del núcleo de concreto.



Figura 68. Sitio de extracción del núcleo No.22., km 47+015. A) Vista general del talud y del punto de la extracción. B) Interior de la perforación, se detalla el corte de las varillas que fueron extraídas como parte del núcleo de concreto.

Según se observa en las figuras anteriores, en estos taludes los núcleos de concreto fueron extraídos junto con las varillas de la malla electrosoldada. En 18 de los 19 sitios que fueron inspeccionados por el LanammeUCR fue posible identificar la presencia de varillas de acero en la superficie de corte del concreto, consecuentemente estas varillas formaban parte los núcleos de concreto que fueron extraídos.

La presencia de estas varillas en la superficie de corte también fue verificada mediante el uso de un imán telescópico extensible, según se muestra en las siguientes figuras.

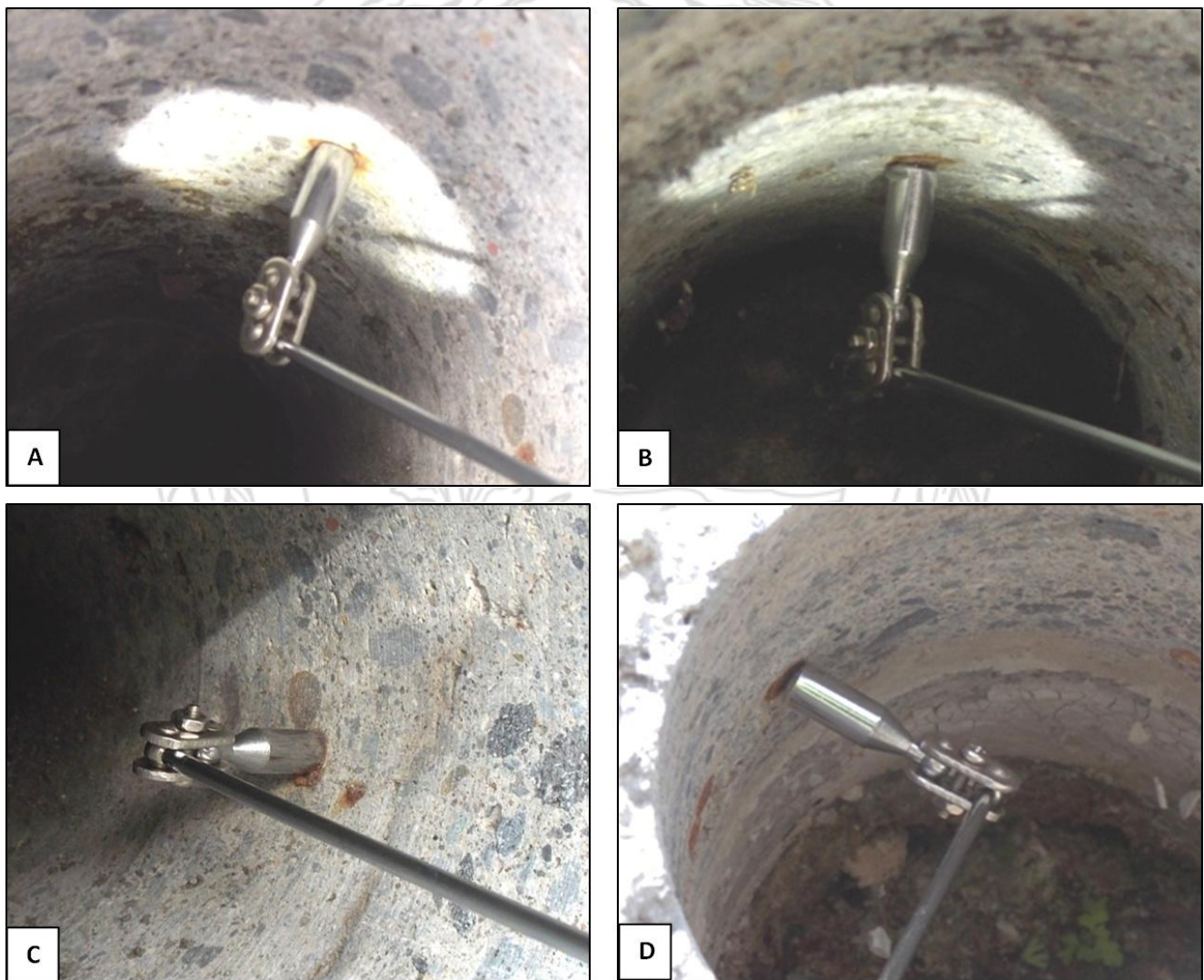


Figura 69. Verificación de la presencia de varillas en las superficies de corte. A) km 38+150, B) km 38+180, C) km 38+150, D) km 38+515.

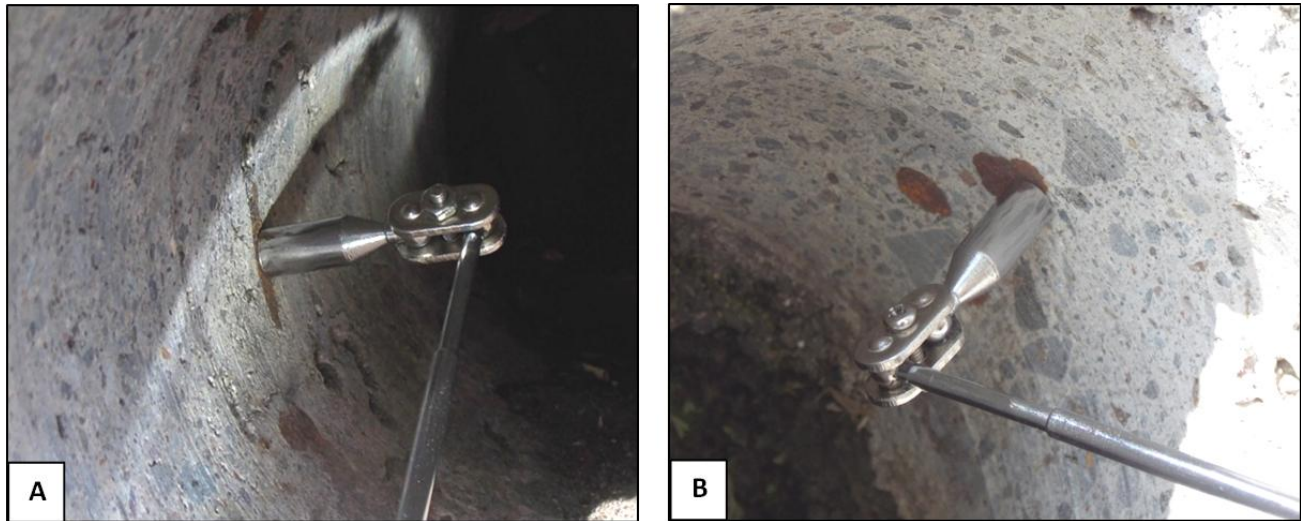


Figura 69. Verificación de la presencia de varillas en las superficies de corte. A) km 44+185, B) km 46+390.

En el informe del Consultor de GLOBALVIA, no se encontró referencia alguna sobre la existencia de varillas dentro de los núcleos de concreto que fueron extraídos y ensayados. A pesar de que en la página 2 del informe indican que en el laboratorio realizaron una descripción visual de los núcleos, esta descripción no fue incluida en el informe.

En este sentido, acudiendo nuevamente a normas internacionales para este tipo de ensayos, la norma estandarizada para la obtención y ensayo de núcleos de concreto lanzado, la ASTM C1604/C1604M – 05 (Reapproved 2012) “*Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores of Shotcrete*”, en los apartados 4.5 y 6.1.4 establece claramente que los especímenes que contengan barras o mallas de refuerzo de acero, no deben ser utilizados para determinar la resistencia a la compresión o a la tensión del concreto.

La norma citada hace esta advertencia debido a los efectos que tienen las varillas de acero en el comportamiento de la resistencia a la compresión de los núcleos de concreto. Las varillas de acero producen variaciones en el comportamiento mecánico del núcleo, modifican su respuesta a la compresión y alteran los datos de resistencia del concreto, siendo precisamente este el valor de resistencia el que el ensayo busca determinar.

Como parte de los datos recolectados en el campo, se midió la profundidad de varias de las perforaciones realizadas por el Consultor, estas mediciones fueron comparadas con las alturas de los núcleos, reportadas en su informe No.3707-15. Resultado de esta comparación se encontró que las dimensiones eran las mismas o presentaban pequeñas diferencias menores a 2,0 cm. En el informe en cuestión no se indica si los núcleos de concreto fueron cortados o modificados de alguna forma para separar una sección que no contuviera varillas de refuerzo, y de esa forma ensayarlos según la normativa mencionada.

En el caso de que los núcleos fueran ensayados tal y como fueron extraídos, es decir, con el refuerzo de varilla de acero, la resistencia de estos núcleos no corresponde con un valor normado y no representan la resistencia real del concreto en los sitios evaluados, ya que los valores están influenciados por el efecto de las varillas de acero de refuerzo. En dicha condición los valores no pueden ser comparados con las resistencias especificadas para el concreto en aplicaciones como la que aquí se está estudiando, y no son concluyentes sobre la condición de este material en los taludes de la Ruta Nacional No.27.

Adicionalmente, con base en el mecanismo de falla estudiado en la sección 7.8 de este informe, el concreto del talud del km 38+600 ha fallado por la alteración de las superficies en las que el ácido sulfúrico entra en contacto con el concreto, lo que degrada localmente el concreto y genera oxidación y corrosión severa en el acero. Por lo tanto, el ensayo de compresión realizado por el Consultor del Concesionario en los núcleos de concreto no brinda información sobre el mecanismo de falla que se ha observado en estas obras de contención.

En cuanto a los espesores de concreto reportados por el Consultor, existe un sesgo implícito en la selección del sitio de extracción de los núcleos, ya que como lo indican en la página No.2 *“En la mayoría de los casos y por la facilidad de acceso los núcleos fueron extraídos al nivel de la carretera; aunque en dos casos específicos se pudo acceder a las partes altas del talud para obtener las muestras a ese nivel.”* (INSUMA INF No.3707-15). En el proceso de colocación del concreto lanzado en taludes es común que en la parte inferior del talud se coloquen espesores mayores a los que se colocan en las partes media y superior, debido a la acumulación, en la zona baja, de materiales caídos durante el proceso de lanzado.

Se citan por ejemplo, los espesores medidos en las muestras de concreto analizadas en la sección 7.5.1 de este informe, las cuales fueron obtenidas de la parte media y superior del talud del km 38+600 (ver figura 14) y tienen un espesor promedio general de 8,75 cm. Siendo este valor menor que los 15 cm que reportó el Consultor en su informe, como promedio del espesor del concreto.

Tomando en cuenta lo anterior, aunque el valor de espesor promedio obtenido por el Consultor, es aceptable para esta aplicación, no es representativo de los espesores de concreto que han sido colocados en los taludes de la Ruta Nacional No.27. Para lograr obtener un valor realmente representativo del espesor del concreto lanzado se requiere de un trabajo estadístico, metódico y minucioso de obtención de muestras y mediciones.

En cuanto al peso unitario del concreto lanzado determinado por el Consultor en su estudio, nuevamente se debe tomar en cuenta el mecanismo de deterioro que ha sido identificado y analizado en la sección 7.8 de este informe. Tal como se ha establecido, la pérdida del componente calcáreo del concreto se propaga en las superficies que están expuestas al Drenaje Ácido de Roca del talud, a través de las fisuras del concreto entra en contacto con el acero e inicia un proceso agresivo de oxidación y corrosión que culmina con el colapso del concreto y el refuerzo metálico.

Considerando lo anterior, al analizar núcleos de concreto con espesores entre 10 cm y 20 cm, como los especímenes extraídos por el Consultor, la pérdida del componente calcáreo que puede estar presente en una de sus superficies por efecto del DAR, no va a generar una diferencia en el peso unitario del núcleo completo. Por lo que no es de extrañar que en el estudio el Consultor haya obtenido pesos unitarios del orden de $2,2 \text{ T/m}^3$, aún cuando en varios de los taludes que muestrearon el concreto está degradado y agrietado, con el acero corroído e incluso haya colapsado y caído en la carretera junto con el material que conforma el talud.

La disminución en el peso unitario del concreto, producto de las reacciones con el ácido del talud, debe ser estudiada en las zonas del concreto que afectivamente han experimentado este deterioro, tales como las zonas que se presentan en las figuras 20 – 25 de la sección 7.5.1 de este informe. Además, para poder establecer una disminución del peso unitario, el valor obtenido de los ensayos debe ser comparado con la densidad que tenía este concreto al momento de ser colocado sobre el talud, comparación que no fue realizada por el Consultor de GLOBALVIA en su estudio.

9. CONCLUSIONES

Conclusiones Generales.

De acuerdo con los resultados obtenidos se evidencia que uno de los principales factores que influyó en el desprendimiento del concreto lanzado en el km 38+600, es la degradación del concreto y el acero de refuerzo producto del drenaje ácido de roca (DAR).

El DAR afecta directamente la consistencia del concreto lanzado, deteriora la resistencia del acero de refuerzo y afecta la condición y el desempeño de los sistemas de drenaje, ocasionando la falla de la pantalla de concreto del sistema de anclaje, situación que genera un peligro para los usuarios de la vía concesionada.

Varios sectores aledaños al tramo del km 38+600 que se deslizó el 9 de agosto del presente año, tienen condiciones geológicas y geotécnicas similares al material que falló. Esto deriva en un alto potencial de presentar deslizamientos similares en estos sectores, con un alto impacto en la seguridad de los usuarios.

La peligrosa combinación de estas condiciones amerita implementar un plan integral de intervención, con medidas en el corto plazo, así como el diseño y construcción de obras para la estabilización y protección superficial permanente y efectiva de estos taludes.

El concreto lanzado con malla electrosoldada y anclajes de acero no son compatibles con el proceso de DAR, debido al deterioro acelerado que éste produce. Mucho menos en condiciones tan extremas como las que se han medido en varios taludes de la RN-27. Volver a colocar concreto lanzado o anclajes en un sitio donde ya ha colapsado el concreto por DAR constituye una reconstrucción de la vulnerabilidad, que expone nuevamente a los usuarios de la vía al riesgo derivado de la caída de materiales en la carretera.

Es preocupante para el LanammeUCR la poca importancia que el Concesionario y su Consultor le dan al impacto que el DAR ha tenido en las obras que se han construido, así como el impacto que el DAR tendrá en las obras que planean reconstruir. Esto retrasa la atención efectiva del problema e impide garantizar la seguridad para los usuarios y el nivel de servicio que contractualmente debe cumplir el Concesionario.

La Supervisora del proyecto, la empresa Consorcio Getinsa-Gabinete, en sus informes coincide con este Laboratorio en la imperante necesidad de plantear medidas de tratamiento y controles adecuados para los sitios con DAR. Sin embargo, no es claro para este Laboratorio el manejo que el Consejo Nacional de Concesiones está haciendo de estas recomendaciones, y cuáles acciones concretas está realizando, como fiscalizador del proyecto, para garantizar el cumplimiento de estas obligaciones por parte del Concesionario, ya que del análisis de la información suministrada a este Laboratorio, se concluye que el CNC no se ha opuesto, con base en las disposiciones normativas contractuales vigentes, a que el Concesionario reconstruya la vulnerabilidad en este punto de la carretera.

El común denominador en el ciclo de vida de todo proyecto de infraestructura es el “Control”. En el caso de un proyecto de infraestructura administrado por la vía de concesión, este control lo debe ejecutar en primer término la Administración, siempre de cara a lo establecido en el Contrato. Es un grave error conceptual creer que el control se puede delegar o creer que es parte de las obligaciones del Concesionario. Todo activo dentro del derecho de vía, sea una concesión o no, debe administrarse y controlarse, todo aspecto potencialmente riesgoso para los usuarios debe atenderse con rigurosidad técnica.

Conclusiones específicas.

Sobre los taludes del km 38+600.

- De acuerdo con las observaciones e identificación mineralógica de los materiales del sitio, los análisis de pH del agua superficial del 2014, los resultados de la conductividad eléctrica del agua superficial y los resultados de los análisis de pH en pasta que se realizaron a las muestras del sitio para este informe, se concluye que en los taludes del km 38+600 se está generando Drenaje Ácido de Rocas.
- Condiciones geológicas y geotécnicas como la pendiente, las propiedades y la alteración del suelo y la roca, así como la afectación que presenta el concreto lanzado y el acero de refuerzo por el efecto del DAR, se combinaron con la lluvia intensa para generar la caída de concreto, suelo y rocas en la carretera, el día 9 de agosto del 2015.

- Actualmente en este sitio el nivel de riesgo para los usuarios es alto, considerando la gran cantidad de vehículos que transitan la ruta, la geometría del talud, la cercanía con la carretera y la deteriorada condición del concreto, el suelo y la roca del lugar.
- En las zonas en las cuales el concreto presenta agrietamiento, el acero de refuerzo presenta grados avanzados de corrosión, la sección transversal del acero ha disminuido al igual que su ductibilidad. El acero en estas condiciones falla de manera frágil, con muy poca deformación.
- Los ácidos que se generan en el talud entran en contacto con el concreto y reaccionan con el componente calcáreo de este. Este deterioro propicia que el ácido alcance el acero de refuerzo, provocando su corrosión y degradación. La pérdida de resistencia del acero aumenta la aparición de grietas en el concreto. Una vez alcanzada la condición severa de deterioro, el empuje hidrostático ácido provoca la caída del concreto agrietado, junto con el suelo y las rocas propias del talud.

Sobre otros sectores con deterioro en el concreto lanzado.

- En los taludes de los estacionamientos 38+500 a 38+600 se encontró evidencia de estar presentando DAR, se observaron además grietas en el concreto, eflorescencias, lixiviación de óxidos de hierro, así como pendientes y alturas similares a las que presentaban los sitios que han sufrido deslizamientos, por lo que se consideran con alto potencial de experimentar también desprendimiento del concreto y caída de suelo y rocas.
- En el talud del lado derecho del km 47+000, el concreto lanzado empieza a presentar los mismos síntomas y la misma condición que presentaba el talud del km 38+600 hace aproximadamente 3 años. Si no se toman acciones correctivas en el corto plazo, los mecanismos de deterioro identificados en otros taludes con condiciones similares, hacen prever un avance en el deterioro de las obras de protección en este talud. El deterioro en un grado avanzado puede derivar en desprendimiento del concreto lanzado, junto con el suelo y las rocas que conforman el talud en este punto de la carretera.

Sobre los informes presentados por la Concesionaria.

- En los tres informes presentados por la Concesionaria (2804-15, 3707-15 y 3713-15), el Consultor a cargo del informe desestima la influencia del DAR en el proceso de deterioro del concreto lanzado. Presenta resultados de pruebas realizadas a especímenes que, de acuerdo con la información aportada, no cumplen los requisitos establecidos en las normativas ASTM aplicables, y que además, no representan los mecanismos de falla identificados por el LanammeUCR con base en el análisis de los hechos observados en el campo.
- En estos informes no se analizan las causas de fondo que han provocado el deterioro y la falla de las soluciones geotécnicas que el Concesionario construyó en el talud del km 38+600. De forma especulativa le atribuyen el colapso de estas estructuras únicamente al empuje hidrostático.
- El Consultor del Concesionario propone para el talud del km 38+600 colocar nuevamente anclajes, malla electrosoldada y concreto lanzado. Instalar nuevamente estos materiales en este talud de la carretera equivale a reconstruir la vulnerabilidad, exponiendo nuevamente a los usuarios al riesgo derivado de la caída de concreto, suelo y rocas en la carretera.

10. RECOMENDACIONES

Las recomendaciones que se presentan a continuación con respecto a la identificación y caracterización del proceso de DAR en los taludes de la RN-27, fueron presentadas a la Administración en el informe LM-PI-UGERVN-003-2015 y en informes anteriores. Se considera necesario presentarlas nuevamente debido a los criterios contenidos en la información que ha sido remitida al LanammeUCR por parte del Consejo Nacional de Concesiones, información que ha sido ampliamente analizada en el presente informe.

Se recomienda a la Administración, a través del Consejo Nacional de Concesiones, solicitar las siguientes acciones por parte del Concesionario:

- Identificar todos los taludes de la RN-27 con indicios de presentar Drenaje Ácido de Rocas. Una vez identificados, en cada uno de ellos se recomienda realizar un programa de muestreo general y detallado (si lo requiere) de rocas y suelos para realizar pruebas de pH en pasta.

Con la información generada se podrá caracterizar cada talud y servirá como base para determinar la mejor solución para cada caso.

- Implementar soluciones y planes de mantenimiento adecuados para tratar el DAR.
- Generar y desarrollar un programa de monitoreo que sea un proceso rutinario y sistemático de medición de pH de las aguas que salen de los sistemas de drenajes de los taludes caracterizados. Con los datos generados con este programa se podría tener un mejor control para determinar la evolución de DAR en los taludes.
- Realizar análisis geoquímicos detallados de aguas en los taludes donde se identifique DAR, para determinar cuáles elementos puedan estar siendo lixiviados y transportados al sistema fluvial de la zona.
- Implementar medidas urgentes, como remover el material que presenta alta probabilidad de falla, incluyendo el concreto, el suelo y la roca, mantener cerrado el carril adyacente al talud y monitorear constante el comportamiento del talud, principalmente ante eventos importantes de lluvia, caída de materiales y/o el colapso de los sistemas de drenaje.
- Realizar estudios técnicos, diseñar soluciones e implementar planes de mantenimiento para todas las acciones consideradas para el manejo de las condiciones señaladas en este informe.

Con respecto al DAR en general en la RN-27

Se recomienda realizar un estudio detallado de la variación de la acidez del agua que se infiltra por los taludes y que es evacuada por los drenajes sub horizontales, en los sitios con concreto lanzado que presenten indicios de estar generando DAR. Incluir un análisis de la dirección del flujo de agua. Para este tipo de estudios se recomienda hacer pozos exploratorios para colocar piezómetros y caracterización geológica, geotécnica y geoquímica de los materiales en profundidad.

Con respecto al km 48+000

Se recomienda considerar los estudios básicos y en detalle necesarios para el diseño apropiado de una intervención para este tramo de la carretera. Incluir técnicas adaptadas para minimizar el efecto del DAR, controles de erosión, control del agua de escorrentía, etc.

Se recomienda también considerar los estudios necesarios para determinar la profundidad de la zona de afectación por DAR en este sitio. Para esto, se sugiere realizar perforaciones verticales y horizontales en las bermas de estos taludes. Se recomienda realizar pruebas de pH en pasta al material recuperado en cada perforación.

11. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al geólogo Jorge Aguilar por sus aportes en la toma de muestras, el levantamiento de datos en el campo, y los análisis de laboratorio de pH en pasta en el Laboratorio de Geoquímica de la Escuela Centroamericana de Geología. Así mismo al geólogo Alejandro Arauz por la ayuda brindada en diferentes fases de este informe.

12. REFERENCIAS

ADAMS, C. B., C. A. KLAMKE, AND C. L., HOLLABAUGH. 1999. Geochemical monitoring of Kiser, Creek, near Buchanan, Haralson County, Georgia: the effects of pyrite-rich rocks on the pH, iron, and sulfate content of surface waters. *Ga. J. Sci.* 57(2):113-122.

ASOCIACIÓN COSTARRICENSE DE GEOTECNIA, ACG, 2010: Reporte de Inspección Geotécnica de los taludes de corte entre las estaciones 14 + 000 a 52 + 000 Ruta 27 San José - Caldera. Publicación AGC.0110 San José Costa Rica. 49 pp.

ASTM INTERNATIONAL C39/C39M-15a *“Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimen”*. ASTM , USA.

ASTM INTERNATIONAL C1604/C1604M – 05 (Reapproved 2012) *“Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores of Shotcrete”*. ASTM, USA.

AYORA, C., S. CHINCHON, A. AGUADO, AND F. GUIRADO. 1998. Weathering of iron sulfides and concrete alteration: thermodynamic model and observations in dams from central pyrenees, Spain. *Cement and Concrete Research.* 28(9):1223-1235.

- BERUBE, M., J. LOCAT, P. GELINAS, J. CHAGNON, AND P. LEFRANCOIS. 1986. Black shale heaving at Sainte-Foy, Quebec, Canada. *Can. J. Earth Sci.* 23:1774-1781.
- BLOWES, D., PTACEK, C., JAMBOR, J. & WEISNER, C. (2003): The Geochemistry of Acid Mine Drainage.- *Treatise on Geochemistry* 9:149-204.
- CHINCHON, J.S., C. AYORA, A. AGUADO, AND F. GUIRADO. 1995. Influence of weathering of iron sulfides contained in aggregates on concrete durability. *Cement and Concrete Research.* 25(6):1264-1272.
- DOLD, B., 2010: Basic Concepts in Environmental Geochemistry of Sulfidic Mine-Waste Management. Institute of Applied Economic Geology (GEA), University of Concepción Chile. 27 pp.
- DOUGHERTY, M. T. AND N. J. BAROSTTI. 1972. Structural damage and potentially expansive sulfide minerals. *Bull. Assoc. Eng. Geol.* v. 9. 2: 105-125.
- FOX, D., C. ROBINSON, AND M. ZENTILLI. 1997. Pyrrhotite and associated sulphides and their relationship to acid rock drainage in the Halifax Formation, Meguma Group, Nova Scotia. *Atlantic Geology.* 33: 87-103.
- GRATTAN-BELLEW, P. E., AND W. J. EDEN. 1975. Concrete deterioration and floor heave due to biogeochemical weathering of underlying shale. *Can. Geotech. J.* 12: 323-378.
- HAWKINS, A. B. AND G. M. PINCHES. 1987. Cause and significance of heave at Llandough Hospital, Cardiff - a case history of ground floor heave due to gypsum growth. *Quart. J. Eng. Geol.* 20:41-57.
- HOLDRIDGE, L. R., 1967: Life zone ecology. –Tropical Science Center. San José, Costa Rica. 206 pp.
- IGARISHI, T. AND T. OYAMA. 1999. Deterioration of water quality in a reservoir receiving pyritebearing rock drainage and its geochemical modeling. *Eng. Geol.* 55:45-55.

INSTITUTO METEOROLÓGICO NACIONAL - (IMN), 2015. Boletín Meteorológico Mensual, Agosto 2015. ISSN 1654-0465, 39pp

LANAMMEUCR, Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (UGERVN), 2014: Informe de Evaluación del Proyecto San José - Caldera Ruta Nacional 27 Año 2013 - 2014, San José Costa Rica. 167 pp.

LANAMMEUCR, Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (UGERVN), 2015: Estudio de Presencia de drenaje ácido de roca (DAR) en taludes de la Ruta Nacional LM-PI-UGERVN - 003-2015, San José Costa Rica. 167 pp.

LOUGHNAN, F.C., 1969. Chemical Weathering of the Silicate Minerals. Elsevier. New York, 154 pp.

MATHEWS, R. C. JR., AND E. L. MORGAN. 1982. Toxicity of Anakeesta Formation leachates to shovel-nosed salamander, Great Smoky Mountains National Park. J. Environ. Qual. 11(1):102-106.

MILLER, W. L., C. L. GODFREY, W. G. MCGULLY, AND G. W. THOMAS. 1976. Formation of soil acidity in carbonaceous soil materials exposed by highway excavation in East Texas. Soil Sci. 121(3):162-169.

MINISTERIO DE ENERGÍA Y MÍNAS DE PERÚ, (MEM-PERÚ), 2015: Anexo A: Geoquímica ambiental Métodos de análisis. Consulta de internet realizada Ene 2015, sitio web: http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dgaam/estudios/tambogrande/file_001/anexos/11_Anexo%20XI%20Linea%20Base%20Geoquimica.pdf

MORGAN, E. L., W. F. PORAK, AND J. A. ARWAY. 1982. Controlling acidic-toxic metal leachates from southern appalachian construction slopes: mitigating stream damage. Trans. Res. Record. 948:10-16.

MOUM, J. AND I. TH. ROSENQVIST. 1959. Sulfate attack on concrete in the Oslo region. J. Am. Con. Inst. 31(3):257- 264.

- ORNDORFF, Z., DANIELS, L. & DIAS, L. (2004): Evaluation of sulfidic materials in Virginia Highway corridors.- Environmental Geology 46:209-216.
- PARIZEK. E. J. 1982. Geology and space beneath a city; Kansas City. Rev. in Eng.Geol. 5:63-73.
- PENNER, E., J. E. GILLOTT, AND W. J. EDEN. 1970. Investigations of heave in Billings shale by mineralogical and biogeochemical methods. Can. Geo. J. 7: 333-338.
- PORRAS, H., CASCANTE, M., GRANADOS, R. & ALVARADO G. E., 2012: Volcano-estratigrafía y tectónica del Valle Central Occidental y las estribaciones de los Montes del Aguacate a lo largo de la Ruta 27, Costa Rica. - Rev Geol. Amer. Central, 47: 69-93.
- PROGRAMA IBEROAMERICANO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA EL DESARROLLO, 2000. Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado. 3ra edición.
- SHANKS P. 2012: Hydrothermal alteration, Volcanic Massive Sulfide Occurrence Model. Scientific Investigation Report 2010-5070-C. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- SLACK, J.F., 1993: Descriptive and grade-tonnage models for Besshi-type massive sulphide deposits, in Kirkham, R. V Sinclair, W.D., Thorpe, R.I., and Duke, J.M., eds., Mineral deposit modeling: Geological Association of Canada special Paper 40, p. 343-371.
- RUIZ, S. (2004): Propuesta de un protocolo para la predicción y evaluación de la generación de drenaje ácido de roca en minas auríferas en explotación.- 83 págs. Univ. de Costa Rica [Tesis Lic.].
- RUIZ, P., ARAÚZ, A & BARRANTES R.,: Metodología para determinar la presencia de drenaje ácido de rocas en taludes de carreteras, caso práctico: Ruta Nacional 27, San José - Caldera, Costa Rica. XII Congreso Nacional de Geotecnia - CONGEO 2015, San José Costa Rica.

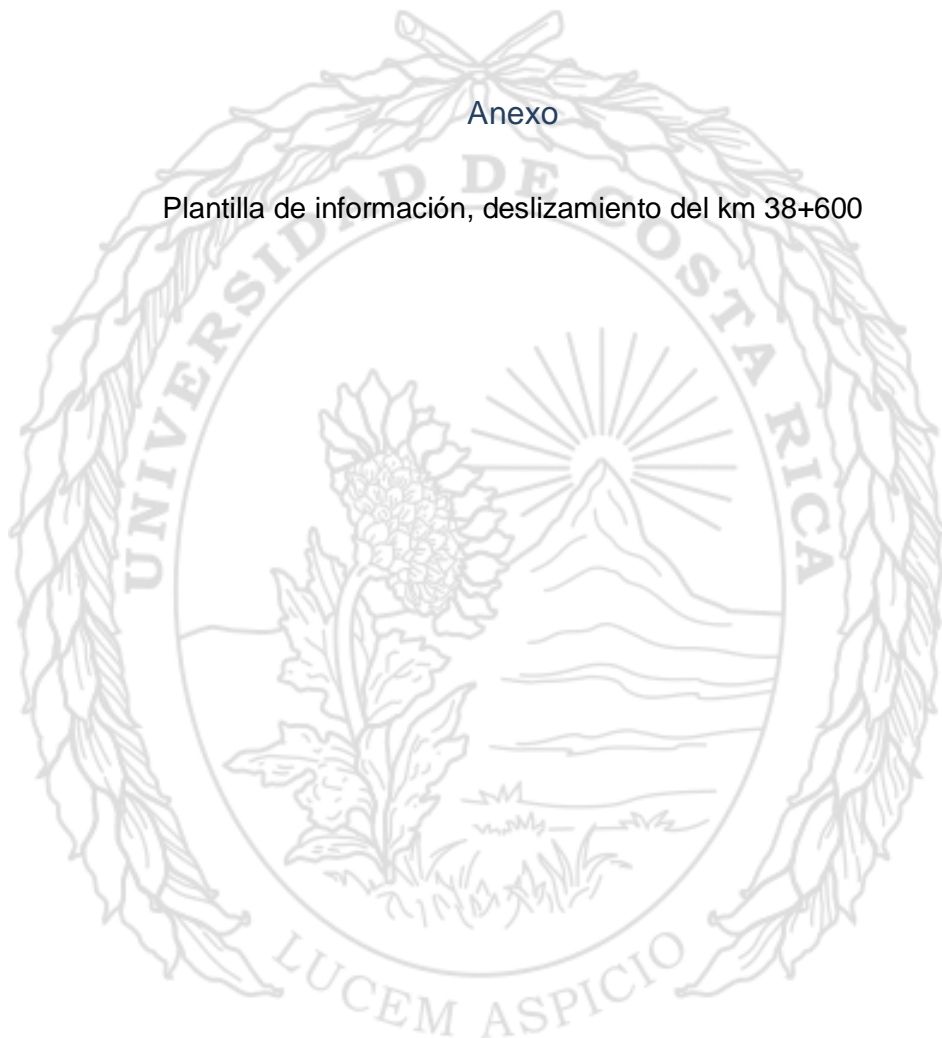


United States Environmental Protection Agency (USEPA) Office Of Solid Waste Special Waste Branch. 1994: Technical Document Acid Mine DARinage Prediction. Epa530-R94-036 Ntis Pb94-201829. 52 pp.



Anexo

Plantilla de información, deslizamiento del km 38+600



Informe de inspección de talud		1/4
1 – Datos generales		
1.1 Fecha de inspección: <u>11 de agosto de 2015</u>	1.2 Ubicación general: <u>km 38+600 RN27</u>	
1.3 Profesional responsable: Nombre: <u>UGERVN</u> No. profesional: _____ Institución/Empresa: <u>Lanamme UCR</u>	1.4 Condición del talud: <input checked="" type="checkbox"/> Deslizamiento identificado <input type="checkbox"/> Talud con potencial de deslizamiento <input type="checkbox"/> Talud estable	
2 – Localización		
2.1 Ubicación del talud Coordenadas CRTM-05:	Provincia: <u>Alajuela</u> Norte: <u>1098463.062 m</u>	Cantón: <u>Atenas</u> Oeste: <u>455565.504 m</u> Distrito: <u>Escobal</u> Elevación: <u>387</u> msnm
2.3 Otras referencias: _____		
3 – Características generales		
3.1 Uso del suelo		3.2 Densidad de población
<input type="checkbox"/> Área urbanizada <input type="checkbox"/> Terreno natural	<input checked="" type="checkbox"/> Camino, carretera <input type="checkbox"/> Otros: _____	<input type="checkbox"/> Alta <input type="checkbox"/> Baja <input type="checkbox"/> Media <input checked="" type="checkbox"/> Nula
3.3 Tipo de vegetación		3.4 Condición de la vegetación
<input type="checkbox"/> Árboles <input type="checkbox"/> Arbustos	<input type="checkbox"/> Pasto <input checked="" type="checkbox"/> Ninguna	<input type="checkbox"/> Alta <input type="checkbox"/> Dispersa <input type="checkbox"/> Media
3.5 Manejo de aguas		3.6 Condición del sistema de drenaje
<input type="checkbox"/> Natural <input checked="" type="checkbox"/> Artificial	<input type="checkbox"/> Inexistente	<input type="checkbox"/> Buena <input type="checkbox"/> Mala <input type="checkbox"/> Obstruida <input checked="" type="checkbox"/> Insuficiente
3.7 Tipo de relieve		3.8 Perfil de la ladera
<input checked="" type="checkbox"/> Escarpado <input type="checkbox"/> Montañoso	<input type="checkbox"/> Ondulado <input type="checkbox"/> Suave	<input checked="" type="checkbox"/> Cóncavo <input type="checkbox"/> Convexo <input type="checkbox"/> Uniforme
4 – Características específicas		
4.1 Tipo de talud visitado		4.2 Geometría (ver croquis en 5.12)
<input type="checkbox"/> Ladera natural <input type="checkbox"/> Talud en relleno	<input checked="" type="checkbox"/> Talud en corte <input type="checkbox"/> Otros: _____	Altura media (m) <u>35m</u> Inclinación (°) <u>> 55</u> Altura máx (m) <u>47m</u> Longitud (m) <u>190m</u>
4.3 Condición de saturación		4.4 Obras de contención existentes
<input type="checkbox"/> Seco <input checked="" type="checkbox"/> Húmedo <input checked="" type="checkbox"/> Saturado <input type="checkbox"/> Otro, ver croquis adjunto: _____	<input checked="" type="checkbox"/> Flujo de agua en corona <input type="checkbox"/> Flujo de agua al pie <input checked="" type="checkbox"/> Flujo de agua intermedio	<input checked="" type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No Tipo: <u>Concreto lanzado con anclajes de acero</u>
4.5 Naturaleza del material		4.6 Origen del material
<input checked="" type="checkbox"/> Suelo <input type="checkbox"/> Roca <input type="checkbox"/> Otros: _____	<input type="checkbox"/> Con grietas <input type="checkbox"/> Sin grietas <input checked="" type="checkbox"/> Con bloques <input checked="" type="checkbox"/> Poco fracturada <input type="checkbox"/> Fracturada <input type="checkbox"/> Con bloques	<input checked="" type="checkbox"/> Suelo residual <input type="checkbox"/> Deposito aluvial <input type="checkbox"/> Coluvio <input type="checkbox"/> Relleno <input type="checkbox"/> Escombros <input type="checkbox"/> Basura Otros: <u>Brecha volcánica con matriz arcillosa</u>
4.7 Evidencias de movimiento o deterioro		
<input type="checkbox"/> Grietas en el terreno <input type="checkbox"/> Árboles inclinados <input type="checkbox"/> Coronas	<input type="checkbox"/> Levantamiento del pie del talud <input type="checkbox"/> Basculamiento de bloques <input type="checkbox"/> Lagunas sin afluentes visibles	<input checked="" type="checkbox"/> Grietas en estructuras <input type="checkbox"/> Otros <input type="checkbox"/> Desprendimiento de concreto lanzado.

5. Informe de inspección de talud con deslizamiento identificado

2/4

Fecha de ocurrencia del deslizamiento: 9 de agosto de 2015

5.1 Elevaciones del deslizamiento

Corona: 404 msnm Punta: 387 msnm Pie: 387 msnm Cima: ---- msnm

5.2 Tipo de material deslizado

Suelo Relleno Arboles Otros: _____
 Roca Basura Todos los anteriores _____

5.3 Modo de falla en suelo

Rotacional Traslacional Compuesto Hundimiento
 Otros: _____

5.4 Modo de falla en roca

Planar Cuña Volcamiento Otros: _____

5.5 Superficie de deslizamiento

Suelo - Suelo Suelo - Roca Roca - Roca No identificada

5.6 Geometría estimada

5.6.1 Longitud total	Lt = <u>23</u> m	
5.6.2 Superficie de ruptura	Largo Lr = <u>17</u> m	Profundidad Dr = <u>≈ 1.5</u> m
	Ancho Wr = <u>44.7</u> m	
5.6.3 Desplazamiento de la masa	Largo Ld = <u>7.5</u> m	Profundidad Dd = <u>----</u> m
	Ancho Wd = <u>44.7</u> m	

5.7 Volumen estimado de la masa deslizada (Fell, 1994)

<input type="checkbox"/> Extremadamente pequeño menor de 500 m ³	<input checked="" type="checkbox"/> Muy pequeño 500 m ³ a 5.000 m ³	<input type="checkbox"/> Pequeño 5.000 m ³ a 50.000 m ³	<input type="checkbox"/> Mediano 50.000 m ³ a 250.000 m ³
<input type="checkbox"/> Medianamente grande 250.000 m ³ a 1000000 m ³	<input type="checkbox"/> Muy grande 1.000.000 m ³ a 5.000.000 m ³	<input type="checkbox"/> Extremadamente grande mayor de 5.000.000 m ³	

5.8 Velocidad del deslizamiento (Cruden y Varnes, 1996; Hungr et al, 2014)

Extremadamente rápido (5 m/s) Muy rápido (3 m/min) Rápido 1,8 m/hr Moderada (13 m/mes)
 Lenta (1,6 m/año) Muy lento (16 mm/año) Extremadamente lenta No determinada

5.9 Factores generadores del deslizamiento

Lluvia Sismo Cortes Rellenos
 Erosión Otras causas antrópicas Deterioro del concreto por DAR

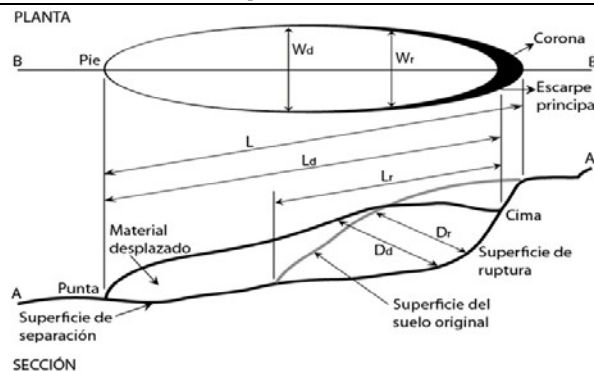
5.10 Consecuencias del deslizamiento

Víctimas fatales (n° ----) Víctimas no fatales (n° ----) Obstrucción de vías Destrucción de vías
 Daños en propiedad pública Daños en propiedad privada Sin consecuencias
 Otros: _____

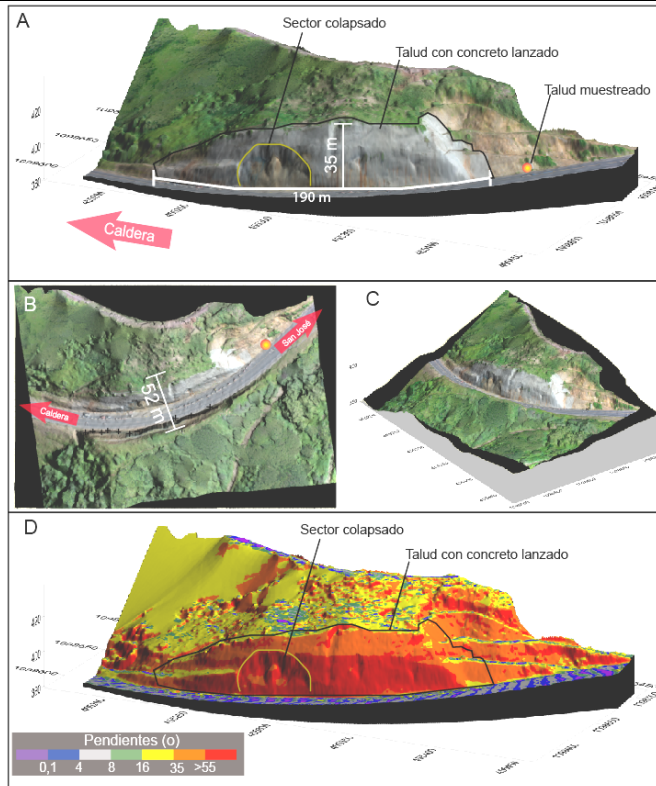
5.11 Antecedentes

¿Se ha presentado antes este tipo de evento en el lugar o cerca del mismo? Sí No
 Explique: Evento similar con caída de concreto, suelo y rocas

5.12 Croquis del deslizamiento



9 – Registro fotográfico (incluir fotografía panorámica, detalles de litología, incidencias y otros detalles)



10 – Croquis (Incluir planta, sección transversal en el punto de mayor altura, de mayor inclinación y en la zona de incidencia)

