

XII Congreso Nacional de Geotecnia - CONGEO 2015

Metodología para determinar presencia de drenaje ácido de rocas en taludes de carreteras, caso práctico: Ruta Nacional 27, San José - Caldera, Costa Rica

Paulo Ruiz Cubillo¹, Alejandro Arauz² & Roy Barrantes³

1: Costa Rica, paulo.ruizcubillo@ucr.ac.cr, Tél: 2511-4015, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME-UCR). Ciudad de Investigación Sede Rodrigo Facio. Geólogo de la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional.

2: Costa Rica, aarauz@coeur.com, Escuela Centroamericana de Geología. Sede Rodrigo Facio. Profesor de Geoquímica Aplicada.

3: Costa Rica, roy.barrantes@ucr.ac.cr, Tél: 2511-4015, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME-UCR). Ciudad de Investigación Sede Rodrigo Facio. Coordinador de la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional.

La metodología planteada en este trabajo consiste en una adaptación de técnicas de geología ambiental para determinar la presencia de drenaje ácido de rocas (DAR) en proyectos mineros. 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.

En este trabajo, se aplicó esta técnica en taludes de corte de la Ruta 27. Estos presentan material volcánico del Mioceno expuesto (Fm. Grifo Alto) en zonas que han sido afectadas previamente por alteración hidrotermal y con presencia de sulfuros. La generación de DAR aquí se da por la acidificación de las aguas naturales como consecuencia de la descomposición por oxidación de rocas que contienen pirita al estar expuesto al agua y 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. Al mismo tiempo, se liberan metales, que pueden incorporarse al agua.

Los resultados de laboratorio (pH de hasta 1,5), así como las evidencias físicas en los taludes, muestran que efectivamente esta carretera presenta DAR en algunos de sus taludes. El DAR en la ruta está afectando directamente las propiedades químicas y físicas del concreto lanzado que se colocó sobre los taludes, el acero electrosoldado y las cunetas para el manejo de aguas superficiales, ocasionando su colapso y generando un peligro para los usuarios. La importancia de identificar este proceso químico y físico que está alterando los materiales de los taludes en

los cortes de la carretera, es fundamental para plantear las medidas correctivas adecuadas y resolver el problema, o al menos minimizar los efectos negativos y su influencia en la inestabilidad de taludes de la ruta.

Methodology to determinate the presence of acid rock drainage (ARD) on road slopes, case study: Route 27, San José - Caldera, Costa Rica

The methodology that we proposed in this paper is an adaptation from the one use in environmental geology to determinate the presence of acid rock drainage (ARD) in mining projects. The pH measurements are made on a paste that is generated with the rocks and/or soils of interest. The obtained data provides an indication of the net generation of acid related to the sample. This occurs because the pH is a fundamental control in the primary reaction rates, as the solubility of the mineral.

In this study, we applied the pH paste technique on the road slopes of Route 27. These slopes, were cut through Miocene volcanic materials (Grifo Alto Fm.) that have been affected by hydrothermal alteration and now are characterized by the presence of sulfurs. The generation of ARD on these slopes is due to the acidification of the natural waters as consequence of the oxidation of the rocks that contain pyrite and are expose to water and air. During the oxidation process of the mineral, sulfur is release and it gets combine with water and oxygen from the air to form sulfuric acid. At the same time, metals are released and they may get incorporate in to the water system.

The laboratory results (pH up to 1,5), and the physical evidence observed in the field, shows that in fact there is ARD in some slopes. The ARD on the route is directly affecting the chemical and physical properties of the shotcrete on the slopes, welded steel and ditch for the surface water management, causing its collapse and creating a hazard for users. The importance of identify this chemical and physical process that is weathering the materials of the slopes in the road cuts, it's essential for the right corrective action and resolve the problem or at least minimize the negative effects and their influence on slope instability of the route.

INTRODUCCIÓN

La identificación de los procesos químicos y físicos que alteran y transforman los materiales que conforman los taludes de carreteras es una labor en la que los geotecnistas tienen que estar directamente involucrados. Un mejor entendimiento de estos procesos, puede llevar a poder plantear medidas correctivas adecuadas para resolver ó minimizar los efectos negativos que generan procesos químicos específicos en la inestabilidad de taludes.

La Ruta Nacional N° 27 (RN-27) fue construida con el propósito de comunicar el Valle Central con la costa pacífica del país y mejorar el desenvolvimiento económico del país. Durante su construcción y posteriormente a su inauguración en el año 2010, esta ruta ha presentado problemas de estabilidad en varios sectores lo cual ha generado deslizamientos que implicaron incomodidad para los usuarios, la interrupción del tránsito y en el peor de los casos fatalidades (La Nación 2010 & Al Día 2011).

Algunos de los taludes con mayores problemas de inestabilidad originalmente habían sido asociados con sitios donde se identificaron rocas volcánicas afectadas por alteración hidrotermal (ACG 2010; Porras et al. 2012; UGERVN 2014). Los trabajos de estabilización que se han dado en algunos de estos sitios incluyeron colocación de mallas electrosoldadas y concreto lanzado el cual con el paso del tiempo ha sufrido una alteración química intensa, hasta el punto de colapsar y generar más inconvenientes para los usuarios (La Nación 2014). Los resultados del informe de LanammeUCR (UGERVN 2015) 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). En este trabajo se presenta en detalle la metodología que se siguió para identificar el DAR en la RN-27 junto con los principales resultados de cada fase de la investigación realizada.

El objetivo principal del presente estudio es brindar una metodología reproducible para que geólogos e ingenieros de carreteras puedan llegar a identificar este proceso químico en otros taludes de la RN-27 y otras rutas nacionales que podrían presentar condiciones similares. La identificación temprana de este fenómeno puede significar maximizar recursos al implementar medidas correctivas adecuadas.

A continuación se describe de forma general el proceso químico de DAR, sus características típicas y los síntomas de un sitio que está siendo afectado. Estas características fueron identificadas en varios de los taludes de la RN-27.

Drenaje Ácido de Roca

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 o sulfuros (p.ej., pirita, arsenopirita, marcasita, calcopirita, esfalerita y galena, 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. Al mismo tiempo, se liberan metales, los cuales pueden incorporarse al agua (USEPA, 1994; Grandia et al., 2009 & Dold, 2010). Esto genera aguas ácidas las cuales afectan las rocas y estructuras civiles, estas aguas son clasificadas según su acidez (USEPA, 1968, 1994 & Ruiz, 2004).

Existen técnicas para determinar el potencial de generación de DAR en una zona antes de realizar destapes de la cobertura vegetal. Estas se basan en el potencial neto de generación de ácido a partir del porcentaje de minerales calcáreos y sulfuroso en las rocas. Esto significa que aunque es complicado, sí se puede predecir si un sitio afectado por alteración hidrotermal con presencia de sulfuros va a sufrir de DAR o no. Este tipo de estudios son muy frecuentes en sitios dedicados a la minería (MEM-PERÚ 1993). No existen registros que indiquen que en la RN-27 se realizaran este tipo de trabajos. En caso de hacer ampliaciones, se recomienda fuertemente que se hagan este tipo de análisis.

El DAR puede permanecer latente por muchos años, y cuando inicia, es muy difícil y extremadamente caro detenerlo (en algunos casos hasta US\$500 000 por hectárea) y puede aumentar paulatinamente. Muchas veces no se puede corregir y puede originar contaminación por muchos años (USEPA, 1994).

Síntomas de un sitio que está siendo afectado por DAR

Algunos de los síntomas del proceso de DAR que se pueden observar en un sitio afectado por este fenómeno según USEPA (1994), y que se identificaron en los taludes de la RN-27, son los precipitados de hierro (III) (*yellow boy*) en las zonas de encharcamiento (aguas de bajo pH), como en las cunetas; la presencia de sulfatos como el yeso, también es común (en mayo del 2014 y abril del 2015 se encontraron cristales milimétricos - centimétricos de este mineral); así como la oxidación de sulfuros, pues en varios sitios se observaron rocas ricas en pirita, cerca de ellas se encontró azufre y en varios sitios es frecuente un fuerte olor azufroso.

METODOLOGÍA PARA IDENTIFICAR DAR EN TALUDES DE CARRETERAS

La metodología planteada en este trabajo para identificar DAR, se menciona a continuación en la figura 1, más adelante serán detallados cada uno de los pasos realizados y se mostrarán los resultados obtenidos en cada uno de ellos para el caso práctico la RN-27.

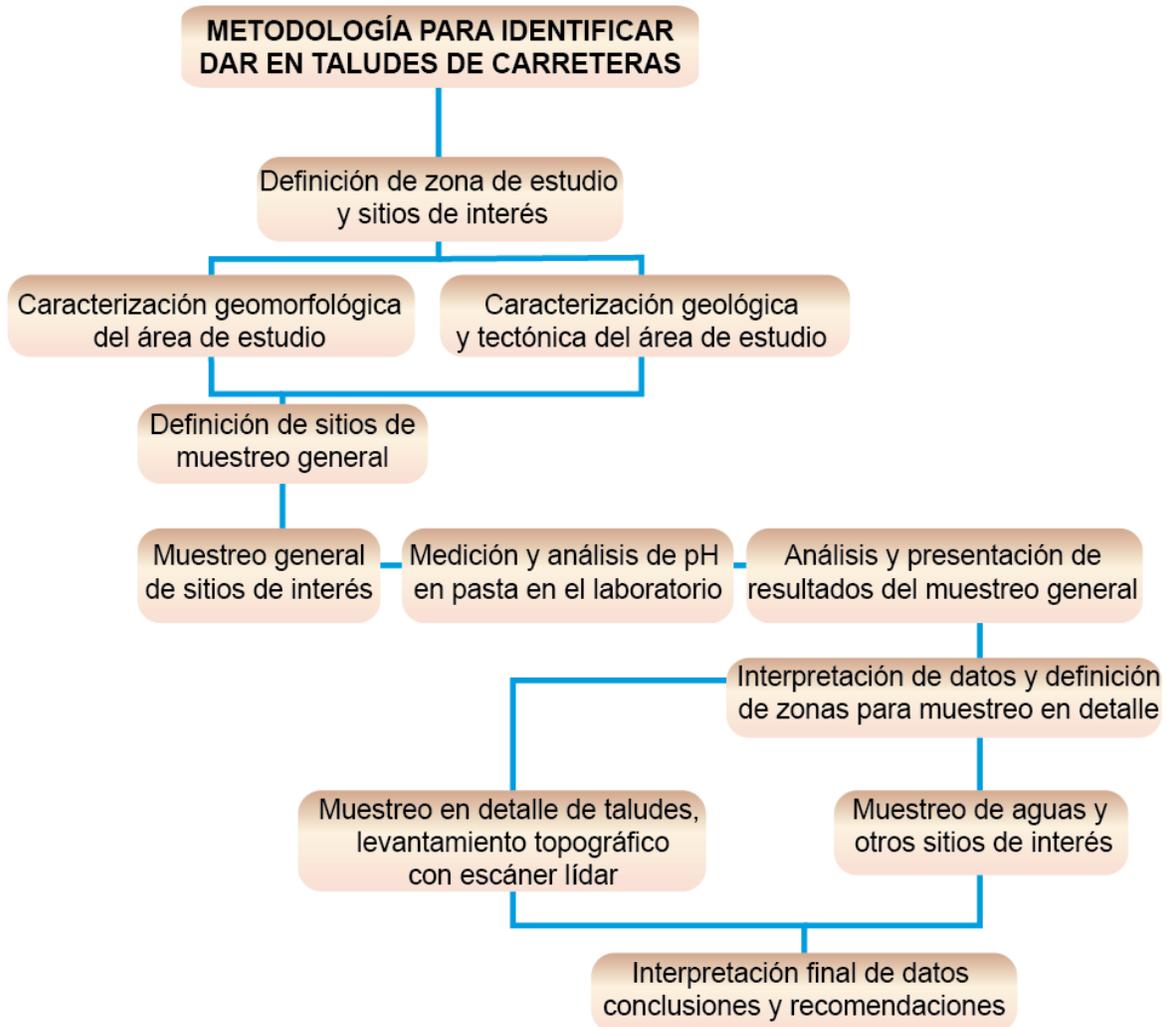


Figura 1. Flujo de diagrama de metodología para identificar DAR en taludes de carreteras aplicado en la Ruta Nacional No. 27.

Definición de zona de estudio y sitios de interés

Para definir los sitios de muestreo, primero se realizó una recopilación bibliográfica de artículos, informes y trabajos realizados sobre taludes inestables en la RN-27. También se buscó información sobre el clima de la zona, datos de precipitación anual y temperaturas máximas y mínimas de la zona ya que estos parámetros tienen afectación en la generación de DAR.

Posteriormente se realizaron giras de reconocimiento para observar y ubicar con GPS los taludes con evidencias de posible DAR. Además de determinar en cuales se podría trabajar con mayor facilidad y sin necesidad de interrumpir el tránsito durante el proceso de muestreo. Con información de la hoja topográfica Río Grande del Instituto Geográfico Nacional (IGN) escala 1:25 000 se generó un modelo de elevación digital (MED) y se ubicaron los sitios asignados para realizar el muestreo (Figura 2).

El área de estudio donde se realizó el estudio y muestreo, se ubica entre los pueblos de Escobal y Orotina sobre la RN-27, en el tramo entre los puentes de la quebrada Concepción y el río Salitral. Se eligieron los taludes ubicados en los estacionamientos de los kilómetros 45+600 y 48+000 para realizar el muestreo. La altitud de los sitios analizados es de entre 210 y 325 m s.n.m (Figura 1). Dentro de la clasificación de zonas de vida de Holdridge para Costa Rica (Holdridge, 1967), 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 precipitaciones de entre 1800 y 4000 mm, y presenta una estación seca bien marcada que puede extenderse hasta por cinco meses, usualmente entre diciembre y abril-mayo.

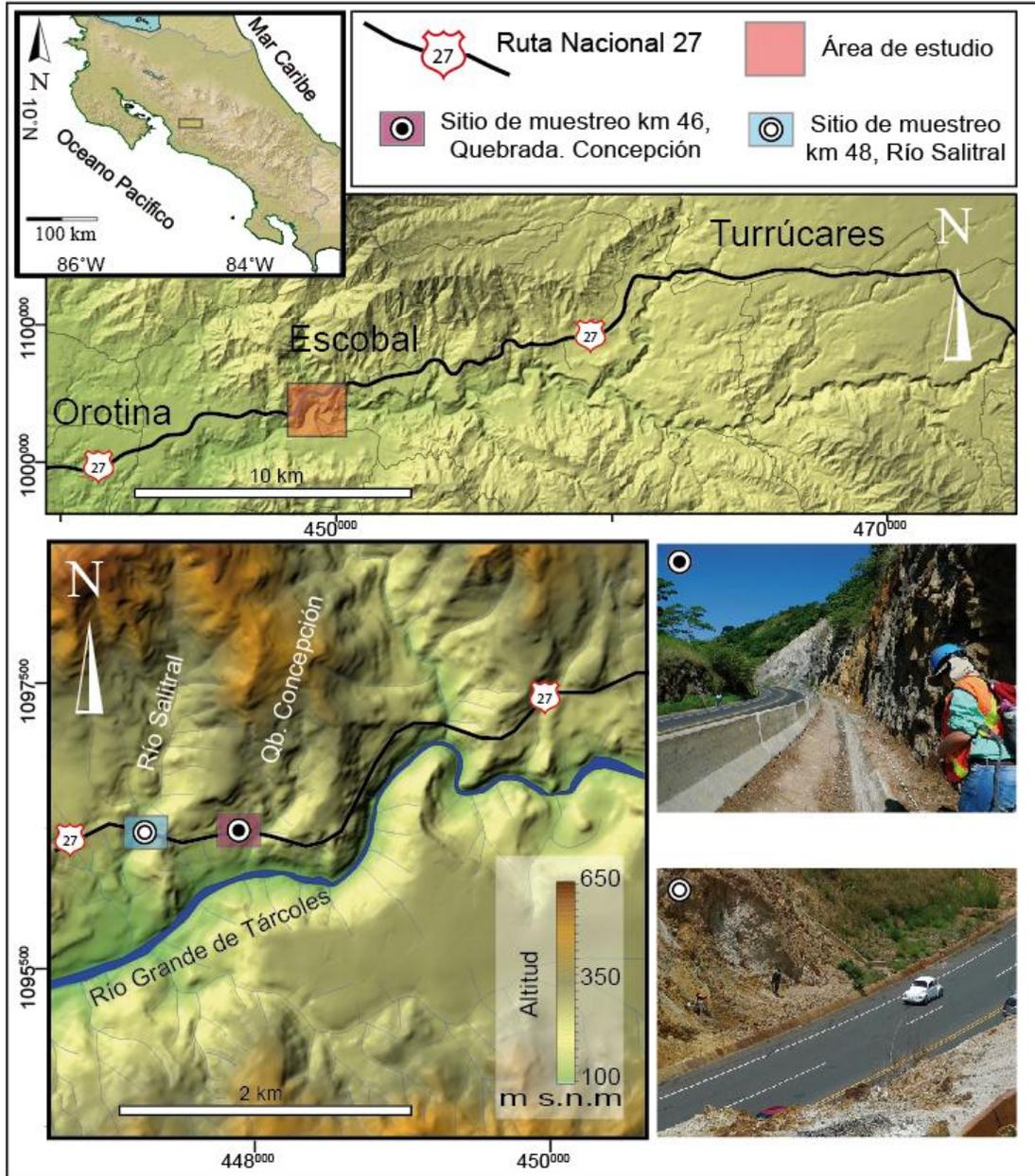


Figura 2. Ubicación del área de estudio sobre un modelo de elevación digital con información sobre la altitud. En el sitio del estacionamiento km 46+600 se tomaron en su mayoría muestras de rocas, mientras que en el sitio del estacionamiento km 48+000 se tomaron en su mayoría muestras de suelo y roca muy alterada. Coordenadas (CRTM-2005).

Caracterización geomorfológica del área de estudio

Esta fase del trabajo incluyó, un estudio detallado de fotografías aéreas del IGN y del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT), así como imágenes satélite de Google Earth® tomadas en diferentes momentos entre los años 2012 - 2015. Con el MED del área de interés se generó un mapa de pendientes, se trazó la red

de ríos y quebradas principales así como los drenajes hasta de tercer orden. Se realizó un análisis general de las direcciones de flujo de estos para entender la dinámica hídrica de la zona. Se definieron posibles fallas y estructuras para luego ser corroboradas en el campo. Con toda esta información, se generó un mapa geomorfológico general de la zona de interés.

La geomorfología de la zona de estudio corresponde con una zona montañosa con laderas denudacionales de origen volcánico con pendientes altas, moderadas y bajas con ángulos que varían entre 8° y 35° . Las pendientes más altas favorecen los procesos denudacionales intensos (deslizamientos) y también son susceptibles a la erosión de suelos. La cobertura vegetal es posible en estas laderas, pero se dificulta una vez que ocurren deslizamientos ya que la pendiente usualmente se incrementa en las zonas afectadas y los suelos quedan descubiertos y más propensos a escorrentía. En la margen izquierda del río Grande de Tárcoles existe un plateau ignimbrítico que presenta pendientes muy bajas $< 10^{\circ}$. El patrón de drenaje en la zona de estudio es de tipo dendrítico con los valles fluviales poco desarrollados en los ríos que son afluentes al Grande Tárcoles que presenta un cañón con sinuosidad moderada y pendientes altas (35° - 55°) y en algunos casos muy altas $> 55^{\circ}$ (Figura 3A). Los cortes realizados por el trazado de la RN-27 han generado pendientes muy fuertes a los lados de la carretera. En algunos casos con ángulos $> 55^{\circ}$, como se describen más adelante. Además los materiales que fueron removidos durante la construcción de la ruta forman ahora conos de talus en las zonas de escombreras.

Caracterización geológica y tectónica del área de estudio

Para generar un mapa geológico general de la zona de estudio, se revisó información bibliográfica. Posteriormente se realizaron varias giras de trabajo, en las que se revisaron afloramientos, se tomaron muestras y se confeccionaron secciones delgadas que fueron analizadas con el microscopio de luz polarizada para su posterior clasificación petrográfica. Se midieron e identificaron algunas fallas y estructuras en el campo.

En general, el área de estudio presenta tres unidades geológicas: 1.) Formación Grifo Alto, 2.) Unidad de epiclastos varios donde predominan materiales de tipo Debris Avalanche, junto con brechas volcánicas y hasta aluviones interdigitados, y 3.) Formación Tiribí, que corresponde con ignimbritas con diferentes facies de enfriamiento. Finalmente hay algunos aluviones ubicados en barras de punto a lo largo del río Grande de Tárcoles, tal y como se observa en el mapa geológico general propuesto para la zona de estudio (Figura 3B).

Las rocas analizadas en los estacionamientos 45+600 y 48+000, corresponden con materiales de la Formación Grifo Alto. Esta formación está compuesta de rocas volcánicas, del Plioceno, expuestas en los montes del Aguacate, predominantemente brechas volcánicas de diversos tipos, constituidas por fragmentos de pómez y de lavas, y depósitos aluvionales, además de coladas subordinadas (Denyer & Arias, 1991; Porras et al., 2012). También se observa en

algunos sectores cuerpos hipoabisales (diques/*sills*) con profusa alteración propilítica, lo que sumado a la fuerte alteración hidrotermal de la zona, evidencia la presencia de un antiguo estratovolcán (Porrás et al., 2012).

Específicamente en los sitios analizados afloran coladas de lavas masivas, afectadas por fallas tectónicas, fracturas, alteración hidrotermal y como se demuestra en este trabajo, DAR. Debido a esto y por los procesos normales de meteorización en una zona tropical, estas lavas presentan diferentes grados de alteración, que van desde poca alteración, hasta la degradación completa de los minerales originales constituyentes de las rocas. En varios sitios donde hay presencia de alteración hidrotermal, las rocas pueden presentar arcillitización intensa o en otros casos (los menos frecuentes) han sufrido procesos de silicificación, tornándose más duras y resistentes a la meteorización química y erosión. Sin embargo, estos sitios no son de gran extensión. Los que sí predominan son los sitios con gran degradación de los materiales, especialmente en el estacionamiento del km 48+000. Un plano de falla identificado en este sitio, tiene un rumbo de N 24° E, con un buzamiento de 66° hacia el NW.

Los resultados de los análisis petrográficos realizados a cinco muestras de rocas mostraron diferentes grados de alteración. Cuatro de ellas se clasificaron como andesitas, algunas de estas con minerales secundarios (calcita, clorita verde, ceolita, hematita y pirita) producto de la misma afectación de procesos hidrotermales. La muestra restante no se pudo clasificar debido a su alto grado de alteración.

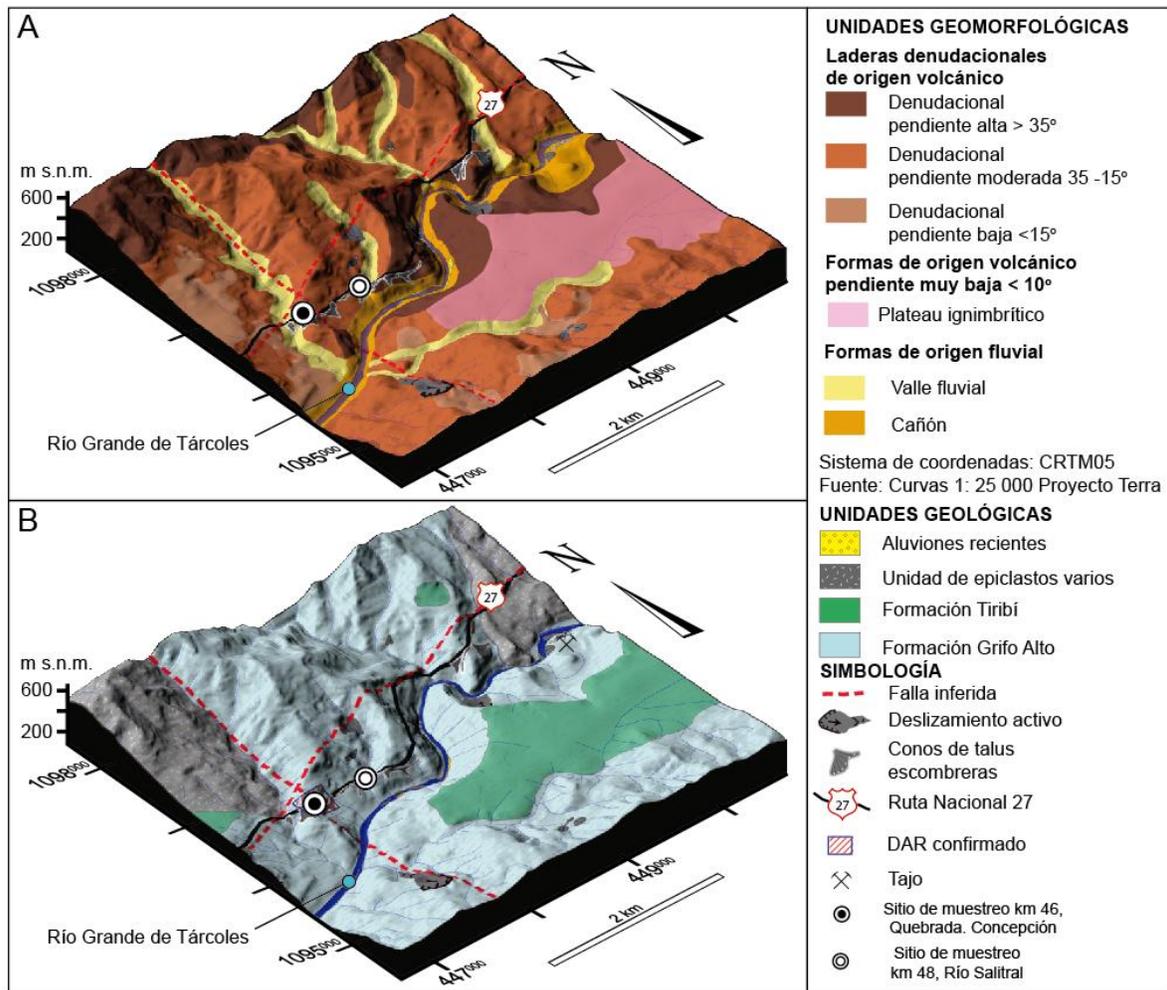


Figura 3. A.) Mapa geomorfológico, se observa cómo en general la RN-27 atraviesa una zona de laderas denudacionales de origen volcánico con pendientes moderadas 16 - 35°, paralelo al cañón del río Grande de Tárcoles. B.) Mapa geológico, se observan los sitios que fueron analizados en este estudio y sus relaciones con las diferentes formaciones geológicas y estructuras tectónicas.

Definición de sitios de muestreo general.

Durante las visitas de campo se identificaron las zonas con taludes expuestos en la RN-27, que mostraban indicios de alteración hidrotermal arcillosa y la presencia de precipitados ferruginosos en los taludes rocosos, cunetas y concreto lanzado. Basados en esta selección y las condiciones para poder trabajar con seguridad sin afectar el tránsito de la vía, se definieron dos áreas de muestreo. La primera se estableció en el estacionamiento del kilómetro 45+600, el cual se definió para la toma de muestras de roca. La segunda zona de muestreo se estableció sobre el estacionamiento del kilómetro 48+000, que se definió para la toma de muestras de suelo, donde se realizó un muestreo general y uno a detalle, a su vez para ambos se realizaron análisis in situ (Figuras 2 y 3).

Muestreo general de sitios de interés.

El muestreo en esta fase del estudio, se hizo de forma sistemática y no aleatorio. Esto con el objetivo de poder delimitar las zonas donde se podrían obtener mayores concentraciones de acidez en las rocas y suelos y posteriormente buscar correlaciones con estructuras o drenajes ubicados en el sitio. Los muestreos pueden ser con una distribución lineal siguiendo la morfología del talud al lado de la carretera y a una misma altura promedio. La otra forma puede ser en una cuadrícula pre-diseñada donde se incluyan muestras en a diferentes alturas en las bermas de los taludes y equidistantes entre ellas y la ruta.

Muestreo de estacionamiento kilómetro 45+600

El muestreo en este sitio fue realizado en el mes de mayo del 2014, estableciendo dos segmentos de trabajo, uno al lado derecho (LD) y otro al lado izquierdo (LI) de la carretera en el sentido San José-Caldera. A lo largo de estos dos tramos se tomaron 37 muestras de roca de al menos 15 cm de diámetro. Cada muestra fue tomada a una distancia mínima de ~5 m entre una y otra, a lo largo de 200 m y a ambos lados de la carretera (Figura 4A). A cada una de las muestras tomadas, se le realizó una descripción litológica macroscópica, se estimó 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 substrajo cada muestra y su ubicación con GPS. Cada una de ellas se rotuló con un código específico y se ubicó dentro del croquis correspondiente (Figura 3A). A una muestra relativamente sana de este sitio se le realizó una descripción mineralógica y petrográfica en detalle con la utilización del microscopio petrográfico con luz polarizante, para su posterior clasificación petrográfica.

Muestreo general estacionamiento kilómetro 48+000

Este muestreo fue realizado en el mes de mayo del 2014 (inicio de la estación lluviosa). Se estableció una cuadrícula en donde se definieron 36 puntos de muestreo (Figura 4B). Estos puntos de muestreo se distribuyeron a lo largo de toda el área, dando prioridad a las zonas que mostraban mayor indicio de alteración por DAR. En cada punto se removió un espesor superficial de suelo de unos 20 cm aproximadamente y se tomó una muestra de 2 kg del material. A cada muestra, se le realizó una descripción breve y se rotularon con un código específico.

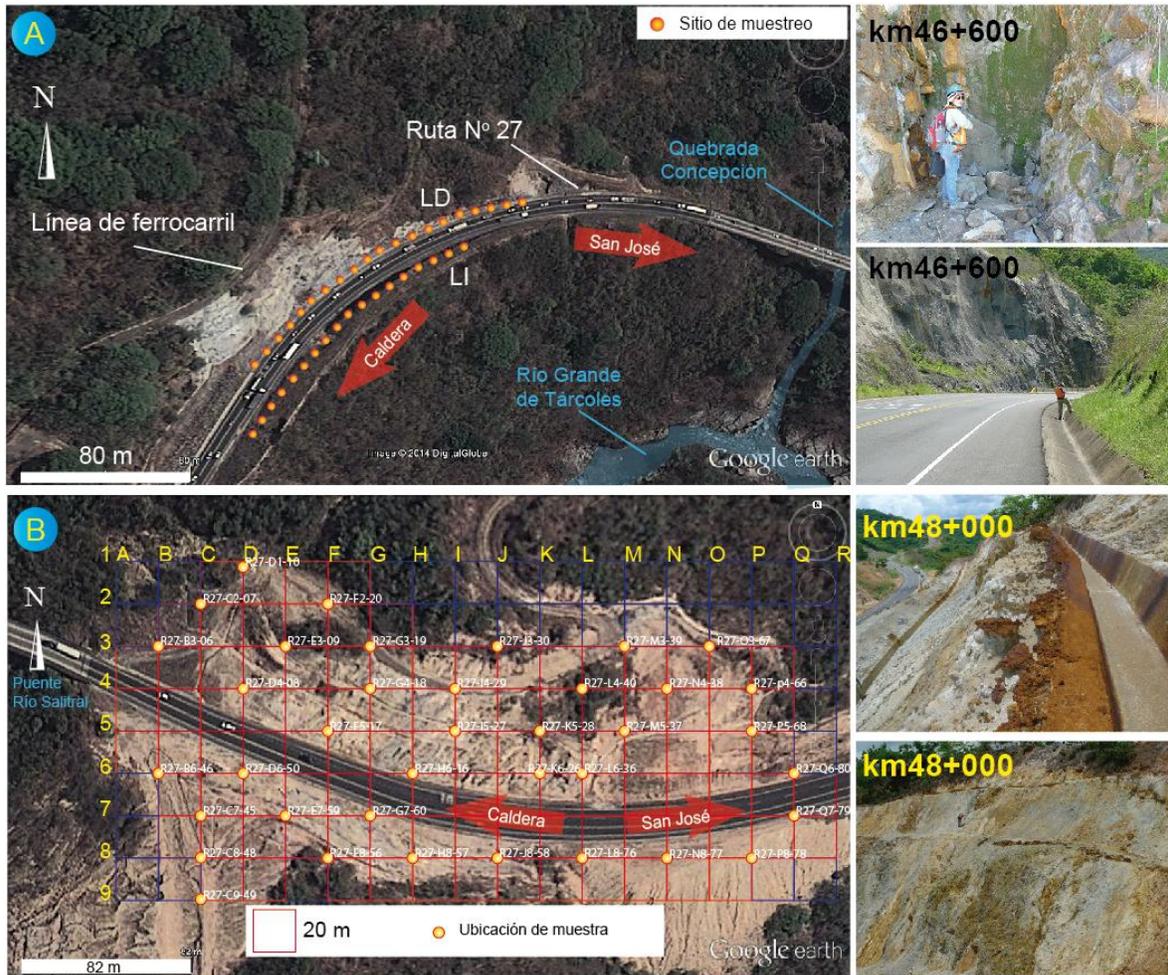


Figura 4. Imágenes tomadas de Google Earth® A) Ubicación del sitio donde se tomaron las muestras de roca para análisis de pH en pasta. Talud con una pendiente general $>55^\circ$ e incluso casi vertical en algunos puntos, presenta dimensiones de 120 m de largo y 14 m de alto, además presenta diferentes tonalidades de color rojo, amarillo y anaranjado típicas de la oxidación de sulfuros y óxidos de hierro. LD = Lado derecho, LI = Lado izquierdo. Se muestran fotografías de los taludes rocoso del sitio. B) Ubicación del sitio donde se tomaron las muestras de suelo en el estacionamiento 48+000, los taludes a ambos lados de la carretera presentan material muy disgregado con diferentes tonalidades (rojizas amarillentas) y grados de alteración (desde poco alterada hasta completamente alterada). Se muestran fotografías de las cunetas afectadas y los taludes de suelo alterado.

Medición de pH en pasta de suelos y rocas 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 de Química del LanammeUCR, mientras que los análisis de pH de rocas se realizaron en el Laboratorio de Geoquímica de la Escuela Centroamericana de Geología (ECG, UCR). En ambos casos, 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 5A) y a cada muestra de roca o suelo seca, se le agrega con 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 agitación en un agitador con una pastilla magnética por 10 minutos a temperatura ambiente (Figura 5B). Mientras tanto, 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 5C). Este proceso se hizo por triplicado y se tomó el promedio de las tres mediciones de cada muestra analizada.

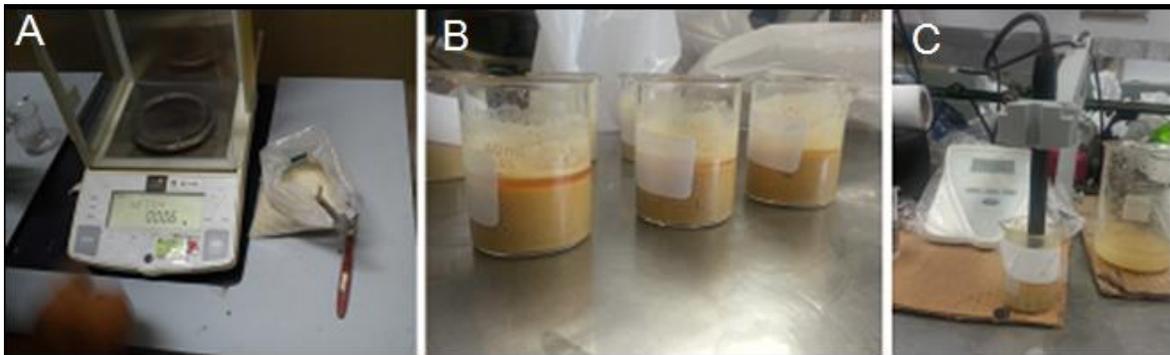


Figura 5. Los análisis de pH en pasta a suelos y rocas de los taludes se realizaron en los laboratorios de geoquímica de LanammeUCR y la ECG respectivamente. A.) Pesaje de muestras pulverizadas y tamizadas. B.) Agua con material pulverizado dejándose reposar. C.) Medición de pH de la muestra con pH-metro electrónico.

Análisis y presentación de resultados del muestreo general

Si los resultados obtenidos del experimento de pH en pasta, dan un resultado de $\text{pH} < 5,5$ esto indica que a partir de las rocas o suelos analizados se está generando una concentración de iones hidronio tal que ocasiona el drenaje ácido de rocas. Esto se puede explicar por la mayor presencia de sulfuros y poca o nula presencia de carbonatos en la composición de la muestra. Cuando este tipo de rocas o suelos ricos en sulfuros, entra en contacto con el oxígeno en medio

acuoso, sumado a la acción catalizadora de bacterias ferro-oxidantes, se genera drenaje ácido de roca. Los valores entre 5,5 y 7 se consideran como de acidez baja. Mientras que si los resultados obtenidos de las mediciones pH son mayores a 7, esto indica que las muestras analizadas van a generar drenajes neutros o alcalinos y se explican por una poca o nula presencia de minerales de sulfuros y una mayor presencia de minerales carbonatados (MEM-PERÚ, 2015).

Los datos obtenidos en las mediciones de laboratorio pueden ser mostrados de diferentes formas. Se sugiere presentar cuadros con los resultados de cada una de las muestras y/o los valores promedio. Las opciones visuales son más directas y facilitan la comprensión de la información. Para las muestras tomadas al lado de la carretera y que siguen la forma del talud, se pueden realizar gráficos binarios donde se muestre en el eje "x" la distancia o el consecutivo entre las muestras. Mientras que en el eje "y" los valores de pH obtenidos de los análisis. El gráfico generado puede ser colocado sobre la imagen donde se muestre la disposición de las muestras. Para el sitio donde se había definido una cuadrícula de muestreo, se recomiendan hacer mapas de isovalores donde se utilice la interpolación más adecuada según la densidad y distribución de datos.

Resultados de muestreo en estacionamiento km 45+600

Los resultados del muestreo realizado en este sitio provienen de 37 muestras de rocas analizadas en el Laboratorio de Geoquímica de la ECG. Estos se resumen en el Cuadro 1 y se muestran gráficamente en la Figura 6A.

Cuadro 1.

Resultados de muestras analizadas en mayo del 2014 de taludes en estacionamiento km 45+600 de la RN-27

Muestras analizadas	37
Temperatura promedio del agua durante mediciones	24,0° C
Valor más bajo de pH	7,29
Valor más alto de pH	9,77
Valor promedio	7,98

Según los resultados obtenidos, las rocas de este sitio, a pesar de tener una coloración rojiza en su parte externa, no están generando DAR. El valor de pH más bajo obtenido en las mediciones del laboratorio fue de 7,29, mientras que el valor promedio de pH fue de 7,98. Por lo tanto, se puede considerar que los materiales rocosos, tanto del talud del LD como del LI están generando drenajes alcalinos.

Los siguientes aspectos se consideran para explicar el carácter alcalino de las rocas de este sitio. A pesar de que la petrografía de la muestra analizada indica la presencia de minerales que podrían corresponder con sulfuros y que en algunas muestras de mano se observaron cristales de pirita, el porcentaje en que este mineral está presente, no parece ser suficiente para que al estar en contacto con el oxígeno y agua se genere ácido sulfúrico. Otra posibilidad para explicar el carácter alcalino de las rocas de este sitio, es la presencia de minerales de alteración de tipo calcáreo (calcita) que están sustituyendo las plagioclasas originales de las rocas. La calcita está actuando como neutralizador y aunque existan sulfuros en las rocas, el carbonato de calcio controla la posibilidad de generar ácido sulfúrico. Posiblemente la pátina rojiza que presentan en la parte externa de estas rocas, sea por deposición de óxidos por los fluidos que corren sobre ellas.

Se considera que los problemas de estabilidad del macizo rocoso que se están dando en este sitio específico, no están directamente relacionados con la inconsistencia de los materiales debido a DAR. Otras variables como las pendientes tan pronunciadas (en algunos casos verticales), las rocas densamente fracturas, 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 caída de bloques.

Resultados de mediciones muestreo general del talud km 48+000

Los resultados del primer muestreo realizado en este sitio provienen de 36 muestras de suelo que fueron analizadas en el Laboratorio de Química del LanammeUCR. En el Cuadro 2, se resumen los resultados estadísticos más importantes del experimento.

Cuadro 2.

Resultados de muestras analizadas en mayo del 2014 de, talud en estacionamiento km 48+000 de la RN-27

Muestras analizadas	36
Temperatura promedio del agua durante mediciones	24,2° C
Valor más bajo de pH	1,32
Valor más alto de pH	5,35
Valor promedio	2,8

Todas las muestras de suelo analizadas en este sitio, presentan una acidez < 5,35, por lo que según la clasificación de USEPA (1994), se podrían agrupar entre altamente ácidas y blandas ácidas. Al realizar una comparación de la acidez de los suelos de este sitio con otros líquidos o compuestos, se nota que estos suelos presentan valores menores que la lluvia ácida (5,5) y la mayoría presentan una acidez similar a la del ácido gástrico (2,0) o ácido de batería (<1,0).

Al mostrar la distribución de acidez de los suelos analizados en este sitio, se observa que las muestras con los valores de pH más bajos están ubicadas en la zona central del talud, tanto del lado izquierdo como del lado derecho. Las muestras ubicadas en sector NE y alejándose del núcleo del talud presentan los valores más altos de pH, sin embargo todas presentan valores por debajo del pH neutro (Figura 6B). La interpolación que se realizó con estos datos fue de tipo triangulación lineal, con el fin de no generar isoclinas en zonas donde no existen datos. En muestreos con mayor densidad de datos se recomienda utilizar otro tipo de interpolaciones como Kriging por ejemplo. El software que se utilizó para generar las isoclinas fue Surfer 10.0, y se superpusieron los resultados sobre la imagen original de la cuadrícula de muestreo. En la parte central del talud se encontraron fracturas y varios planos de falla. Con base en los resultados de pH obtenidos y su distribución cerca de estas estructuras, se consideró que la acidez de los materiales en el talud podría estar directamente asociada con la ubicación de esta zona de falla.

Sin embargo como se describe más adelante, el muestreo en detalle del talud mostró que en realidad el talud en la parte inferior se comporta de forma muy homogénea y que los cambios de pH no son significativos excepto en los bordes del talud.

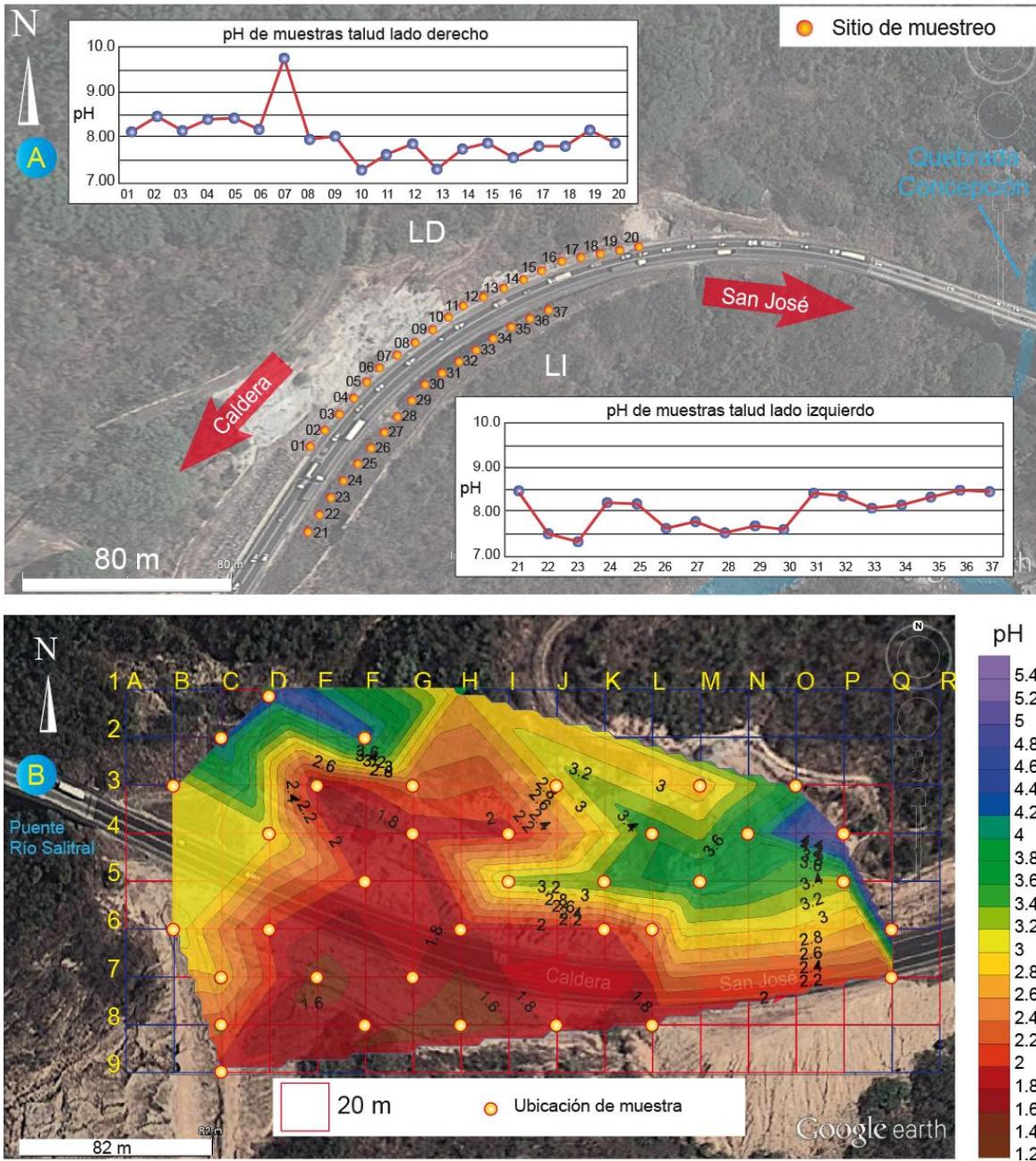


Figura 6. A) Resultados de la determinación de pH en pasta realizados a las rocas ubicadas en los taludes rocosos del estacionamiento 45+600. Como se observa, todas las muestras presentan valores de pH superiores a 7. B) Resultados de muestreo general de suelos en talud de estacionamiento 48+000, la distribución de la curvas se realizó con una interpolación de tipo triangulación lineal, con el fin de no generar interpolación en las zonas donde no existen datos.

Muestreo en detalle de taludes y levantamiento topográfico de taludes

Una vez identificados los sitios donde está ocurriendo DAR en la zona de estudio, se recomienda realizar un muestreo detallado en las zonas que resultaron positivas, con el fin de delimitar mejor aún el área afectada y tratar de buscar correlaciones con fallas y estructuras del sitio. Además de esto, es recomendable hacer un levantamiento topográfico de precisión. La información topográfica es muy importante debido a que se pueden realizar trabajos de caracterización de macizos y determinar tasas de erosión entre otras cosas.

La toma de muestras en detalle, se puede realizar siguiendo la técnica de muestreo sistemático a lo largo del talud donde afloran los materiales. Preferiblemente en una misma berma y a un solo nivel, tomando fragmentos de roca y suelo a lo largo del talud y con un espaciamiento constante.

El levantamiento topográfico detallado de los taludes se puede realizar con diferentes técnicas (topografía convencional, estaciones totales, lidar, etc.). En LanammeUCR se cuenta con un escáner lidar terrestre, por lo que esta fase de la investigación se realizó con este equipo. Las ventajas de trabajar con este equipo son: el detalle milimétrico y la velocidad de levantamiento de datos, la generación de MED con información de pendientes entre otras.

Muestreo en detalle estacionamiento kilómetro 48+000

Durante la estación lluviosa (agosto del 2014), se muestreó en detalle una berma del talud ubicado en el estacionamiento del kilómetro 48+000. En esta ocasión solamente se tomaron muestras en el talud del LI y en la parte baja a nivel de la carretera. Se tomaron 22 muestras de suelo y roca, espaciadas entre sí una distancia de entre 4 a 6 m. También se realizó un escaneo lidar de los taludes de este sitio para poder ubicar con precisión las muestras del talud y mostrar su distribución. Además se obtuvieron los datos paramétricos de los taludes de este sitio incluyendo las pendientes (Figura 7).

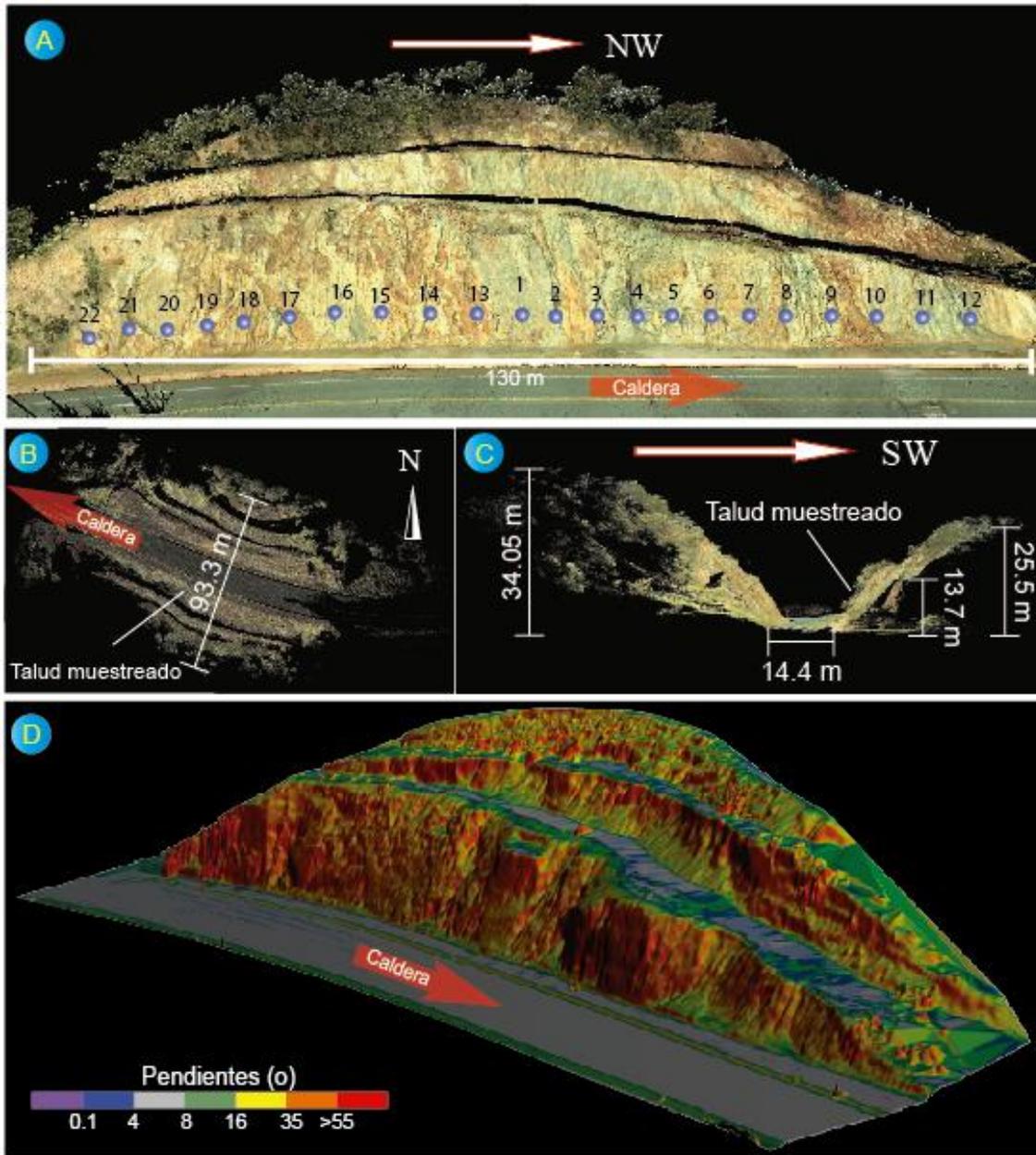


Figura 7. Las siguientes figuras fueron generadas a partir de un levantamiento topográfico que se realizó con el escáner láser de la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional de LanammeUCR. El talud LD tiene una altura máxima 34,05 m y el LI de 25,5 m. Ambos se extienden a lo largo de la carretera aproximadamente 130 m. A) Vista de frente del talud muestreado presentando la ubicación de cada una de las muestras. B) Vista de planta del talud muestreado. C) Vista de perfil del talud muestreado. D) Vista oblicua del talud muestreado con las pendientes de cada una de las bermas.

Resultados de muestreo en detalle, talud estacionamiento km 48+000

Los resultados del muestreo en detalle realizado en este sitio provienen de 22 muestras analizadas y distribuidas a lo largo de la parte inferior del talud LI (Figura 7). Los resultados analíticos se muestran gráficamente en la figura 8.

Según la clasificación de pH de USEPA (1994), este sitio corresponde con una alta acidez, los niveles en algunos casos son muy cercanos a los que se pueden obtener por ácido de batería. El borde izquierdo de la zona de muestreo (primeros 6 metros), presenta el valor más alto (pH 3,31), pero este valor es anómalo comparado con el resto, mientras que los valores más bajos de pH 1,52 están ubicados en la parte central entre los 66 y 78 m.

Se considera que como el muestreo en detalle se realizó en el mes de agosto, cuando la estación lluviosa ya estaba instalada, la lixiviación y movimiento de ácido sulfúrico entre las rocas era mayor que cuando se realizó el muestreo general del sitio en el mes de mayo, cuando las lluvias apenas iniciaban y la movilidad de los fluidos lixivados no era tan alta.

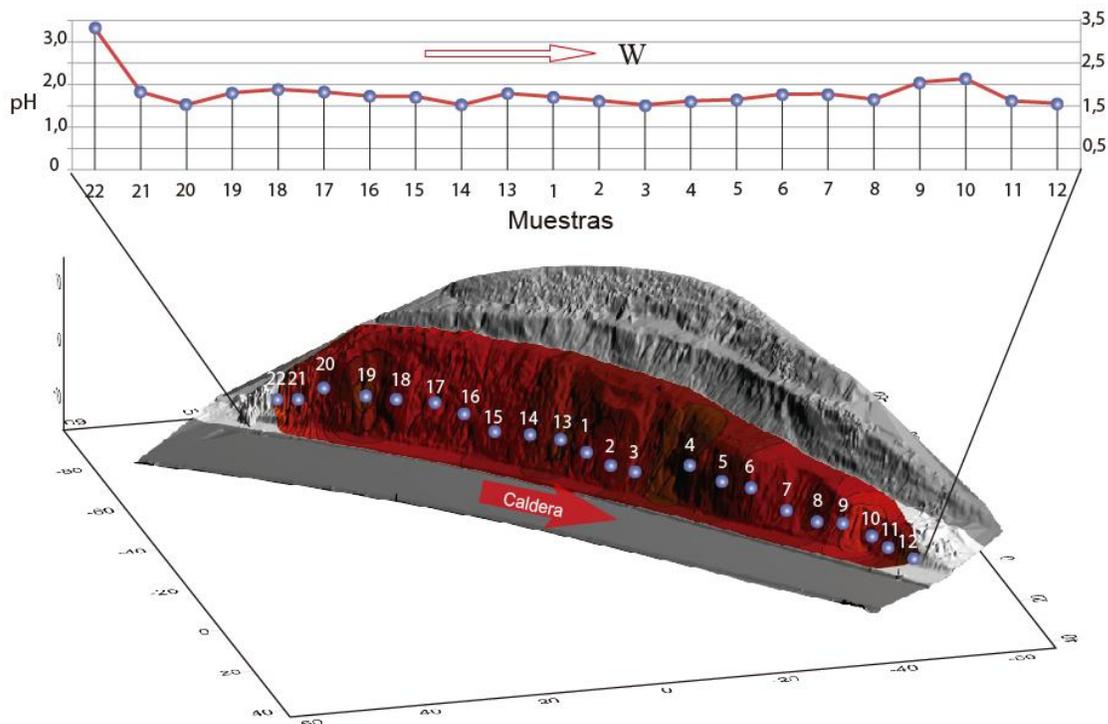


Figura 8. Distribución de pH en los suelos y rocas tomadas de la parte inferior del LI del talud en el estacionamiento del kilómetro 48+000. Nótese cómo la variación es muy poca y casi todas las muestras presentan valores de pH inferiores a 2.

Muestreo de pH de aguas y otros sitios de interés

En aquellos sitios en donde se encontrara agua estancada o saliendo de los drenajes de los taludes, también se hicieron mediciones de pH de agua in situ. Se tomaron fotografías de los sitios en los cuales se realizaron las mediciones y de los resultados obtenidos mediante el pH-metro portátil.

Estacionamiento km 37+700

En este sitio, en el talud del LD hay presencia de pátinas de óxidos de hierro y manganeso en el concreto lanzado y las cunetas. Estas estructuras de drenaje se observan muy desgastadas en la parte central por donde discurre el agua y los agregados líticos están completamente expuestos, lo que evidencia la pérdida del componente calcáreo. El concreto lanzado de este sitio presenta alteración química intensa que ha afectado severamente sus propiedades físicas, hasta el punto de que se desgrana completamente. En la parte inferior del talud, el concreto lanzado está agrietado y permite la salida de agua, que está lavando el material más fino y suelos del talud, lo cual ha ocasionado inestabilidad al talud y hace que el concreto se esté resquebrajando aún más.

Hay puntos en este talud donde las pendientes son muy fuertes con ángulos casi verticales y hasta con pendientes negativas. En las zonas donde el concreto ha colapsado, hay material en voladizo y el acero de las mallas electrosoldadas está expuesto. El acero se presenta con oxidación y corrosión intensa.

Una medición del pH in situ de las aguas que fluyen en la parte inferior del talud, dio como resultado 5,5 (ligeramente ácido, cercano al límite superior de la lluvia considerada ácida). Se considera que las características tan desfavorables presentes en el concreto lanzado y el acero de la malla electrosoldada de este talud, se debe a afectación por DAR. Sin embargo, se recomienda realizar mediciones de pH en pasta de los materiales originales del talud para comprobar esta situación.

Estacionamiento km 45+800

El talud en LD ubicado en este estacionamiento presenta varios indicios de que está siendo afectado por drenaje ácido. Los problemas encontrados corresponden con alteración química y física del concreto lanzado, pérdida de componente calcáreo en concreto de cunetas, exposición de acero y colapso de concreto lanzado (Figura 9).



Figura 9. A) Concreto lanzado con pátinas de óxidos de hierro en la parte inferior. B.) En la parte central se observa la cuneta con acumulación de óxidos de hierro. C) Colapso de concreto lanzado que deja expuesto el acero de las mallas electro-soldadas. D) Acumulación de aguas con coloración rojiza en una cuneta ubicada en la segunda berma del talud LD estacionamiento 48+000 de la RN- 27. Nótese los bordes de color blancuzco producto de la reacción del componente calcáreo del cemento de la cuneta y el agua ácida.

Estacionamiento km 48+000

En este lugar se realizaron mediciones in situ de pH de aguas y de pH en pasta de las rocas alteradas. Los resultados fueron 1,56 y 2,10 respectivamente (Figura 11). Ambos resultados concuerdan muy bien con los datos obtenidos en el laboratorio, tanto para el muestreo general, como para el muestreo detallado que se realizó en este sitio. Todas estas mediciones explican muy bien por qué las cunetas y contra-cunetas están tan alteradas y no hay vegetación en los taludes. La inestabilidad de los taludes de este sitio está directamente relacionada con DAR y se debe de corregir esta situación con las técnicas adecuadas (Figura 10).

Prueba de pH de agua in situ



Figura 10. A.) Se muestra el agua estancada en la cuneta donde se realizó la medición de pH in situ. La coloración rojiza es típica de aguas muy ácidas. B.) Resultado de medición de pH de agua estancada (1,56) un poco menos que el ácido de batería.

CONCLUSIONES

La metodología planteada y utilizada en este trabajo resultó exitosa para la determinación de drenaje ácido de roca en taludes de carreteras. Por ser una metodología relativamente simple y de bajo costo, se considera que puede ser recreada en otros taludes de la Ruta Nacional No. 27, así como incorporarse en la caracterización de taludes en otras rutas nacionales que puedan presentar indicios de este proceso químico.

La aplicación de esta metodología generó resultados que lograron determinar que los taludes ubicados en el estacionamiento 48+000 presentan DAR, mientras que los taludes del estacionamiento 46+600 no. Además de identificar otros sitios donde posiblemente sí se esté dando y actualmente está afectando el concreto lanzado.

El principal mineral generador de ácido sulfúrico en los taludes de la ruta, es la pirita. Este sulfuro proveniente de la alteración hidrotermal de las lavas andesíticas de la Formación Grifo Alto, en conjunto con la gran fracturación presente en esta formación. La exposición óxica al realizar los cortes de carretera, de estas litologías alteradas hidrotermalmente desencadena la oxidación de la pirita. Esta situación afecta directamente las propiedades físicas de las rocas y suelos, así como el concreto lanzado y las cunetas construidas para el manejo de aguas superficiales, ocasionando su colapso y generando un peligro para los usuarios de la carretera.

Hay sitios (km 46+600) que presentaban indicios visuales de DAR como pátinas de óxidos de hierro, pero los análisis de pH en pasta realizados en el laboratorio dieron resultados negativos. Por lo tanto, es muy importante realizar mediciones de pH en pasta en todos los sitios donde se tengan indicios de que está

ocurriendo este proceso (por ejemplo los estacionamientos 37+700 y 45+800), para así poder confirmarlo o descartarlo.

Los problemas de estabilidad del macizo rocoso que se están dando en el estacionamiento 45+600, no están directamente relacionados con el 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.

Los taludes de suelos residuales y roca alterada ubicados en el estacionamiento 48+000, presentan DAR y están influyendo directamente en los problemas de estabilidad de este sitio.

Los valores de pH del agua estancada en una cuneta del estacionamiento 48+000, coincide con los resultados de los análisis de las muestras de roca, por lo que se reafirma el contenido de DAR en el área.

La geometría y las pendientes $> 35^{\circ}$ inciden también en la inestabilidad de los taludes, la sola presencia de DAR no es detonante de inestabilidad, sin embargo afecta considerablemente la pendiente a la que sería estable una estructura. Además se debe generar un manejo adecuado del agua acida generada por los sitios que presentan DAR debido a su alto contenido de iones mayores y acidez, por su alto potencial de año ambiental.

Según los resultados obtenidos en el estacionamiento del km 48+000 donde se demostró la presencia de DAR y las relaciones estructurales de posibles fallas tectónicas que se dan en este sitio específico, se considera que el DAR parece tener una fuerte génesis estructural, por lo que para identificar nuevos sitios con presencia de este fenómeno se recomienda realizar un análisis tectónico detallado del área de estudio y en otras zonas.

RECOMENDACIONES

Recomendaciones generales

El presente trabajo está orientado en la determinación de DAR en la RN-27, sin embargo en busca de una solución a mediano y largo plazo, una mejor caracterización de la geología de área y de este proceso químico es indispensable. Por lo que se recomienda primeramente realizar un cartografiado geológico a una escala de mejor detalle que permita identificar las facies litológicas de la Formación Grifo Alto, con el objetivo de delimitar las zonas con presencia de sulfuros que tengan el potencial de generar DAR, con un énfasis aguas arriba en las líneas de flujo de agua subterránea. Esto presenta un gran costo económico por lo que se debe considerar su factibilidad en comparación a las posibles remediaciones.

Identificar todos los taludes de la RN-27 que presentan indicios visuales y físicos de DAR. Una vez identificados, en cada uno de ellos se sugiere realizar un programa de muestreo general y detallado (si lo requiere) de rocas y suelos para realizar pruebas de pH en pasta como los presentados en este trabajo. Con la información generada se podrá caracterizar cada talud y determinar la mejor solución para asegurar su estabilidad.

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 y poder determinar la evolución de DAR en los taludes, así como cambios de acidez estacionales entre otros.

Las técnicas empleadas en geoquímica ambiental para controlar DAR en proyectos de minería dependen de qué tan avanzado está el proceso de generación de DAR. En la mayoría de los casos, estas técnicas están enfocadas en aislar las rocas que son ricas en sulfuros para así, evitar el contacto con el oxígeno y el agua. Al generar condiciones anóxicas, se reduce la posibilidad de que se forme ácido sulfúrico. Para aislar las rocas, frecuentemente se utilizan, lodos, arcillas y mantas o geomembranas de recubrimiento con una cobertura de materiales inertes. También se incluyen técnicas para neutralizar la acción del ácido sulfúrico al introducir al sistema, rocas ricas en carbonatos (calizas, dolomitas, margas calcáreas entre otras). Todas estas técnicas tienen que ser consideradas y ver la factibilidad técnica de que sean adaptadas para ser aplicadas en taludes de carreteras.

Hacer análisis geoquímicos de aguas más detallados, en los taludes donde se identifique DAR para determinar cuáles elementos pesados están siendo lixiviados, transportados y entrando al sistema fluvial de la zona.

Existen técnicas para determinar el potencial de generación de DAR de una zona antes de que se realicen destapes de terreno. Esto se debió de realizar en los taludes de la RN-27 y se recomienda que se haga en sitios donde se pretenda ampliar esta carretera.

Recomendaciones para el estacionamiento 45+600

Debido a que en este talud no se identificó la presencia de DAR, pero se han presentado problemas de estabilidad (como caída de bloques), se recomienda que se realice una caracterización geotécnica del macizo rocoso que incluya un sistema de clasificación y muestreo de materiales para análisis posterior en el laboratorio de rocas. Una vez caracterizado el talud desde la perspectiva de mecánica de rocas, se podrá determinar la mejor técnica para su estabilización.

Se recomienda hacer un mapeo geológico detallado que incluya un muestreo de rocas y suelos para análisis de pH en pasta del sitio ubicado hacia el norte y noroeste de este talud, debido a que existe la posibilidad de que las pátinas de

óxidos de hierro y manganeso que presentan las rocas en este sitio, estén relacionadas con un sitio afectado por DAR que se encuentre montaña arriba y que también pueda afectar la línea del ferrocarril que pasa por la zona.

Recomendaciones para el estacionamiento 48+000

Este sitio tiene que ser considerado para que se realice una restauración completa e inmediata de los taludes y que incluya técnicas empleadas para el control de DAR, control de erosión, control de aguas de escorrentía e integración paisajística. Este sitio podría subdividirse en secciones y servir como un laboratorio para probar diferentes metodologías de control de DAR y así determinar cuáles son las más efectivas para un ambiente tropical como el de Costa Rica y la geometría de los taludes de la RN-27.

Además de la restauración, en este sitio, es recomendable que se realice un muestreo en detalle y análisis de pH en pasta de los suelos y rocas ubicados en las zonas más cercanas al puente sobre el río Salitral y la zona sur, donde se han ido depositando material de escombros. También que se realice un programa de monitoreo constante durante un periodo de al menos un año, donde se hagan mediciones de pH de las aguas del río Salitral en la parte superior de la cuenca y en el mismo sitio del puente. Se recomienda realizar una evaluación completa del estado del puente y determinar si esta estructura presenta afectación por DAR.

Determinar la profundidad de la zona de afectación por DAR en este sitio. Para esto, se sugiere realizar perforaciones verticales y horizontales en cada una de las bermas de los taludes hasta llegar a la roca sana. Al material recuperado de cada perforación se le deberían de realizar pruebas de pH en pasta.

REFERENCIAS

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.- 49 Págs. Publicación ACG.0110, San José, Costa Rica.

Blowes, D., Ptacek, C., Jambor, J. & Weisener, C., (2003). The Geochemistry of Acid Mine Drainage.- Treatise on Geochemistry, 9:149-204.

Denyer, P. & Arias, O., (1991). Estratigrafía de la región Central de Costa Rica.- Rev. Geol. Amér. Central, 12: 1-59.

Dold, B., (2010). Basic Concepts in Environmental Geochemistry of Sulfidic Mine-Waste Management.- En SUNIL, E. (ed.): Waste Management.- Institute of Applied Economic Geology (GEA), Universidad de Concepción Chile, 232: 173-198.

Grandia, F., Salas, J., Arcos, D., Archambault, A. & Cottard, F., (2009). Impacto del drenaje ácido de explotaciones mineras en la cuenca del Río Margarita y Embalse de Hatillo (República Dominicana).- Bol. Geol. Minero, 120 (4): 595-606.

Holdridge, L.R., (1967). Life zone ecology.- 206 págs. Tropical Science Center. San José, Costa Rica.

Ministerio de Energía y Minas de Perú (MEM-PERÚ), (1993). Guía Ambiental para el manejo de Drenaje Ácido de Minas. <http://edsonplascencia.com/minas/manedrenaje.pdf> [Consulta: Enero 2015].

Ministerio de Energía y Minas de Perú (MEM-PERÚ), (2015). Geoquímica Ambiental, Anexo A: Métodos de análisis. http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dgaam/estudios/tambogrande/file_001/anexos/11_Anexo%20XI%20Linea%20Base%20Geoquimica.pdf. [Consulta: Enero 2015].

Orndorff, Z., Daniels, L. & Dias, L., (2004). Evaluation of sulfidic materials in Virginia Highway corridors.- Environmental Geol., 46(2):209-216.

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. Amér. Central, 47: 69-93.

Shanks, P., (2012). Hydrothermal alteration, Volcanogenic Massive Sulfide Occurrence Model.- 345 págs. Scientific Investigation Report 2010-5070-C. U.S. Geological Survey.

Slack, J.F., (1993). Descriptive and grade-tonnage models for Besshi-type massive sulphide deposits.- En: Kirkham, R.V., Sinclair, W.D., Thorpe, R.I. & Duke, J.M. (eds.): Mineral deposit modeling.- Geol. Assoc. Canada. Spec. Paper, 40: 343-371.

Sobek, A., Schuller, W., Freeman, J. & Smith, R., (1978). Field and laboratory methods applicable to overburden and mine soils.- 203 págs. U. S. Environmental Protection Agency (USEPA).

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, San José [Tesis Lic.].

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 págs. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, San José.

Office of Solid Waste Special Waste Branch, (1994). Technical Document Acid Mine Drainage Prediction.- 52 págs. U. S. Environmental Protection Agency (USEPA).

Referencias hemerográficas

Diario Al Día, (2011) Ruta a Caldera con nuevos derrumbes. Consultado Marzo 2015. http://www.aldia.cr/ad_ee/2011/enero/30/nacionales2667404.html

Diario La Nación, (2010). Deslizamientos en ruta Caldera dejan al menos tres heridos. Consultado Marzo 2015. http://www.nacion.com/nacional/comunidades/Deslizamientos-ruta-Caldera-dejan-heridos_0_1124287641.html

Diario La Nación (2014). Caída de rocas de gran tamaño provocó cierre parcial de vía a Caldera. Consultado Marzo 2015. http://www.nacion.com/sucesos/desastres/Caida-tamano-provoco-alarma-Caldera_0_1432056904.html