



Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales

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

ESTUDIO DE PRESENCIA DE DRENAJE ÁCIDO DE ROCAS (DAR) EN TALUDES DE LA RUTA NACIONAL 27

LM-PI-UGERVN-3-2015

RUTA NACIONAL 27

San José, Costa Rica
Enero, 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.

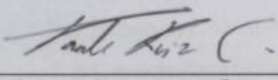
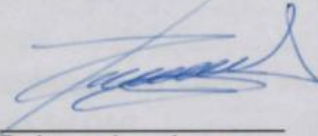

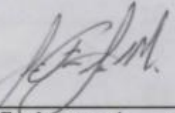
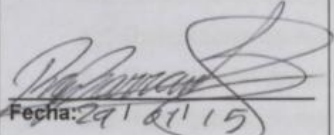
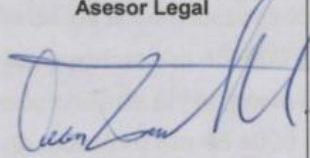
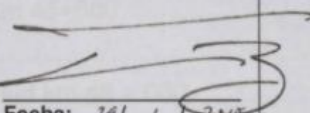
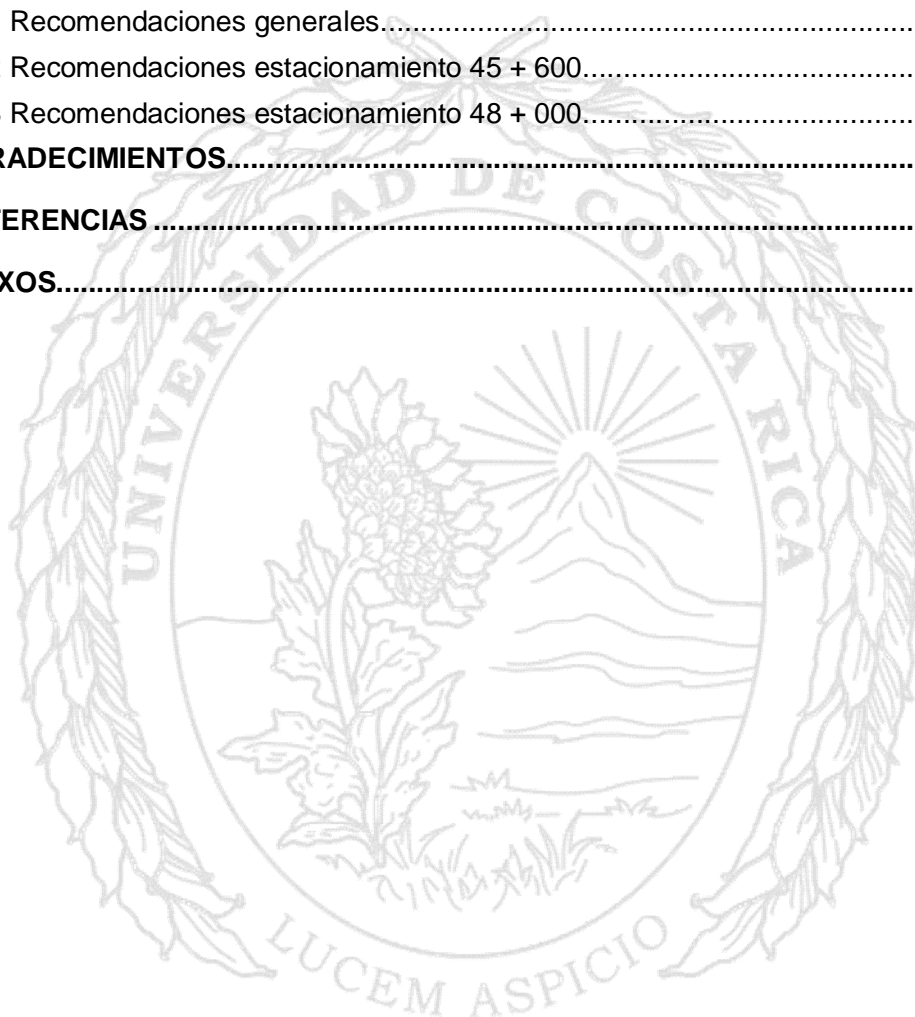
1. Informe LM-PI-UGERVN-3-2015		2. Copia No.1	
3. Título INFORME DE PRESENCIA DE DRENAJE ÁCIDO DE ROCAS (DAR) EN TALUDES DE LA RUTA 27 RUTA NACIONAL No.27 Sección Estacionamientos km 45+000 -48+000		4. Fecha del Informe 26 de Enero, 2015	
5. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales 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 El presente trabajo se enfoca en determinar mediante análisis de laboratorio de pH en pasta y geoquímica de aguas, la existencia de drenaje ácido de roca (DAR) en los taludes de la Ruta Nacional No 27. Los análisis de pH en pasta se realizaron a rocas y suelos alterados de dos taludes ubicados en los estacionamientos 45+600 y 48+000 respectivamente. Mientras que los análisis de geoquímica de aguas se realizaron a muestras de agua estancada y de drenajes a lo largo de varios puntos de la ruta. Los resultados de laboratorio, así como las evidencias físicas observadas en el campo, muestran que hay sitios a lo largo de la Ruta Nacional No. 27 donde efectivamente se está dando DAR. Se observó como el DAR está afectando directamente las propiedades químicas y físicas del concreto lanzado que se colocó sobre los taludes, el acero electrosoldado y las cunetas construidas para el manejo de aguas superficiales, ocasionando su colapso y generando un peligro para los usuarios. El sitio de estudio ubicado en el estacionamiento 45 + 600 presentaba indicios de DAR, pero los análisis realizados en el laboratorio mostraron que en este lugar no se está dando este proceso. Se recomienda estudiar la zona más hacia el norte donde posiblemente si se está dando este proceso y podría llegar a afectar la línea del ferrocarril. Se confirmó la afectación por DAR en el estacionamiento 48+000, donde se midieron muestras con pH tan bajo como 1.5 (similar a la concentración de una celda de una batería de plomo). Es muy importante realizar análisis de pH en pasta en todos los sitios donde se tenga sospechas de que está ocurriendo DAR, para confirmar o descartar su presencia. La importancia de identificar este proceso químico y físico que está alterando las rocas y los suelos 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.			
8. Palabras clave Drenaje ácido, alteración hidrotermal, ruta 27, Caldera		9. Nivel de seguridad: Bajo	10. Núm. de páginas 43
11. Preparado por:			
Geólogo Paulo Ruiz C., Ph.D. UGERVN 	Ing. Ronald Naranjo U. UGERVN 	Ing. Christian Valverde UGERVN 	Ing. José F. Garro UGERVN 
Fecha: 29/01/2015	Fecha: 29/01/2015	Fecha: 29/01/2015	Fecha: 29/ene/2015
Ing. Roy Barrantes Coordinador UGERVN 	12. Revisado por: Lic. Owen Gooten Morales, Asesor Legal 	13. Aprobado por: Ing. Guillermo Loria S., Ph.D. Coordinador General PITRA 	
Fecha: 29/01/15	Fecha: 29/01/2015	Fecha: 29/01/2015	

TABLA DE CONTENIDO

1. POTESTADES.....	5
2. INTRODUCCIÓN.....	5
3. OBJETIVO GENERAL DEL ESTUDIO.....	7
4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS DEL ESTUDIO.....	7
5. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	7
6. METODOLOGÍA, ALCANCES Y LIMITACIONES DEL ESTUDIO.....	9
6.1 Determinación de zonas de muestreo.....	10
6.2 Muestreo de estacionamiento kilómetro 45 + 600.....	10
6.3 Muestreo general estacionamiento kilómetro 48 + 000.....	11
6.4 Muestreo en detalle estacionamiento kilómetro 48 + 000.....	12
6.5 Mediciones de pH de suelo y de aguas superficiales in situ estacionamiento 48 + 000.....	14
6.6 Mediciones de pH de suelos y rocas (pH en pasta) en el laboratorio.....	14
6.7 Mediciones de pH y química de aguas ex situ.....	15
6.8 Alcances y limitantes.....	15
7. DRENAJE ÁCIDO DE ROCAS (DAR).....	16
7.1 Descripción y definición.....	16
7.2 Procesos de generación de ácido sulfúrico asociados en la Ruta Nacional No 27.....	17
7.3 Características típicas del DAR.....	18
7.4 Síntomas de un sitio que está siendo afectado por DAR.....	19
8. RESULTADOS SOBRE DETERMINACIÓN DE PRESENCIA DE DAR EN RN-27.....	20
8.1 Geología y petrografía de los sitios muestreados y analizados.....	20
8.2 Descripción del sitio de muestreo Km 45+600.....	20
8.3 Resultados de las mediciones de pH en pasta Km 45+600.....	22
8.4 Descripción del sitio de muestreo Km 48 +000.....	24
8.5 Resultados de mediciones muestreo general Talud km 48 + 000.....	25



8.6 Resultados de muestreo en detalle talud estacionamiento km 48 + 000	27
8.7 Resultados de análisis de pH y química de aguas en laboratorio.....	29
8.9 Efectos y peligrosidad del drenaje ácido de rocas en la Ruta Nacional No. 27	31
8.10 Medición de pH in situ de aguas y problemas identificados atribuidos a DAR.....	33
9. CONCLUSIONES.....	36
10. RECOMENDACIONES.....	37
10.1 Recomendaciones generales.....	37
10.2 Recomendaciones estacionamiento 45 + 600.....	38
10.3 Recomendaciones estacionamiento 48 + 000.....	38
11. AGRADECIMIENTOS.....	39
12. REFERENCIAS.....	39
13 ANEXOS.....	41





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 importancia de poder identificar cuáles son los procesos químicos y físicos que alteran y/o transforman las rocas y suelos de taludes y cortes de carreteras es fundamental para poder plantear las medidas correctivas adecuadas y resolver el problema o al menos minimizar los efectos negativos que generan estos fenómenos en la estabilidad de estos taludes. La Ruta Nacional No. 27 (RN-27) es vital para el desarrollo económico del país por lo que sus taludes más problemáticos tienen que estar bien caracterizados. Los aportes científicos y técnicos derivados del presente informe se enmarcan dentro de las funciones de ley N°8114 y de los principios de investigación, acción social y transferencia de tecnología que le confieren al LanammeUCR.

2. INTRODUCCIÓN

Durante su construcción y posterior a su inauguración en el año 2010, la RN-27 ha presentado en varios sectores problemas de estabilidad que han sido asociados con sitios donde se identificaron rocas afectadas por alteración hidrotermal (ACG 2010; Porras et al, 2012; UGERVN 2014 & Porras et al, 2012).

La alteración hidrotermal, es producto de la circulación de fluidos termales en las rocas que conlleva a la formación de minerales arcillosos (jarosita, hematita y goetita) y de otros minerales secundarios que podrían comprometer la estabilidad física y química de los taludes (Slack 1993 & Shanks 2012). En una zona afectada por hidrotermalismo también es frecuente observar la presencia de vetas de cuarzo, calcedonia, con acumulación de minerales (sulfuros) que cortan las rocas originales. La presencia de depósitos de óxidos de hierro y manganeso en forma de patinas sobre la superficie de las rocas es originada por la oxidación de los sulfuros. Es posible que los procesos de alteración hidrotermal que se encuentran en varios sitios de la RN-27, pudieron haber ocurrido hace cientos de miles de años y hoy lo que se observa en los cortes de la carretera es el resultado en la roca de este fenómeno. Sin embargo, como se muestra en este trabajo, los



problemas de estabilidad de algunos de los taludes de la RN-27 van más allá de la alteración hidrotermal y es muy probable que las características mecánicas actuales de las rocas de la zona estén directamente asociadas con un proceso llamado drenaje ácido de roca (DAR) que están ocurriendo más recientemente y se definirá en detalle más adelante.

Entre los problemas de estabilidad identificados en los taludes de la RN-27, se pueden mencionar varios mecanismos de colapso y remoción de masa como caída de bloques y deslizamientos de suelos que a su vez colmatan las cunetas y los sistemas de manejo de aguas. Por otra parte, se ha logrado identificar que en sitios que habían sido identificados como inestables por alteración avanzada, las medidas correctivas utilizadas para mejorar la estabilidad de los taludes no han funcionado adecuadamente. En estos sitios se ha observado la presencia de alteración química intensa y colapso del concreto lanzado, deterioro acelerado de cunetas de concreto, oxidación y corrosión de mallas electro soldadas, pernos y anclajes de hierro, así como poca efectividad en procesos de revegetación y controles de erosión. La persistencia de estos problemas y los colapsos de taludes en el 2014, deja en evidencia que las medidas correctivas utilizadas hasta ahora en estos sitios no han sido adecuadas para resolver el problema de la estabilidad.

El drenaje ácido de roca, es una problemática común en las actividades mineras, donde se acostumbra trabajar en grandes zonas con alteración hidrotermal que son destapadas para extraer minerales. Este tipo de drenaje involucra un pH menor a 5 y puede ocurrir por medios naturales o antropogénicos. En algunas excavaciones mineras, la exposición de rocas con sulfuros al oxígeno del ambiente y al agua de lluvia genera este tipo de drenajes. El drenaje ácido de roca se caracteriza por la generación de ácido sulfúrico a partir de la oxidación de los sulfuros en presencia de agua, complicándose el problema con la puesta en solución de metales pesados y/o tóxicos. El mismo principio aplica para la construcción de cualquier obra o estructura que se desarrolle en este tipo de ambiente geológico, como es el caso de varios de los taludes de la RN-27.

En este trabajo se demuestra que en la RN-27 se está dando este fenómeno, el cual sería el responsable de la oxidación y corrosión en el acero de refuerzo de las estructuras de estabilización y de la disolución parcial y debilitamiento del concreto como resultado a la presencia e interacción de ácido sulfúrico y el componente calcáreo en el concreto. Por otra parte, el fenómeno podría estar ocasionando daño al medio ambiente ya que parte de estos drenajes pueden transportar elementos pesados (Plomo, Arsénico, Zinc, Mercurio entre otros) desfogándolos en cauces

naturales cercanos, sin embargo la identificación y comprobación de esto escapa a los alcances de esta investigación. En el marco teórico de este trabajo más adelante se describe detalladamente el fenómeno de DAR y sus implicaciones.

3. OBJETIVO GENERAL DEL ESTUDIO

Verificar la presencia de drenaje ácido de rocas en las unidades litológicas ubicadas a la altura del kilómetro 45 y 48 de la RN-27, empleando la metodología de pH en pasta con el objeto de definir el impacto que este pueda tener sobre la infraestructura de la carretera.

4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS DEL ESTUDIO

- Realizar un muestreo sistemático en suelos y rocas de algunas de las zonas identificadas con indicios de DAR para obtener una cantidad representativa que pueda ser ensayada en el laboratorio.
- Realizar ensayos de pH en pasta para determinar si en este momento se está generando drenaje ácido y medir su intensidad y extensión en los sitios seleccionados.
- Determinar la afectación que se pueda estar dando sobre la infraestructura de la carretera en función de la generación de drenaje ácido.

5. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica entre Escobal y Orotina sobre la RN-27, en el tramo entre los estacionamientos de los kilómetros 45+600 y 48+000, que se encuentra entre los puentes de la quebrada Concepción y el Río Salitral. La altitud promedio de los sitios analizados es de 325 - 210 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 lluvia de entre 1800 y 4000 mm, y presenta una estación seca bien marcada que puede extenderse hasta por 5 meses, usualmente entre Diciembre y Abril/Mayo.

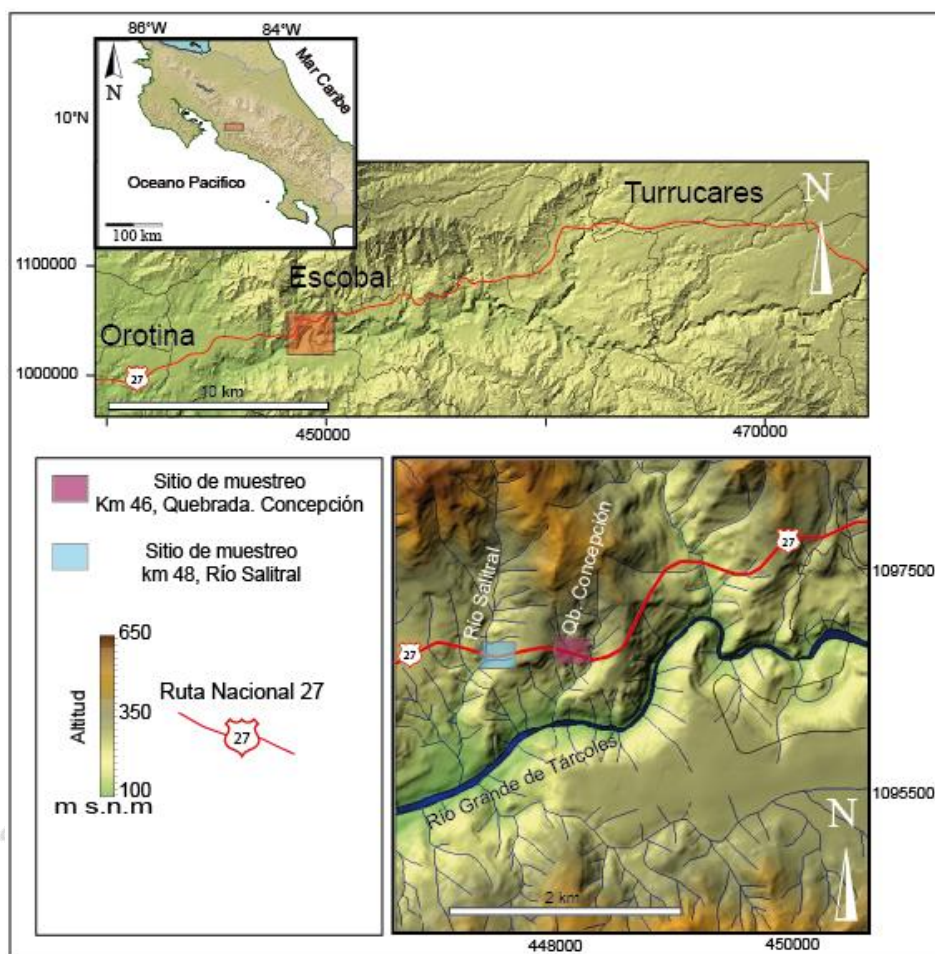


Figura 1. Ubicación del área de estudio sobre un modelo de elevación digital con altitud. En el sitio del estacionamiento km 46+600 se tomaron en su mayoría muestras de rocas, mientras que en el sitio del estacionamiento km 48+000 se tomaron en su mayoría muestras de suelo, coordenadas (CRTM-2005).

Las microcuencas del área de estudio presentan un sistema de drenaje de tipo dendrítico a subparalelo. Las aguas de estos drenajes fluyen principalmente hacia el Oeste y Este en dirección a los ríos Salitral y quebrada Concepción, que a su vez fluyen hacia el Sur, en dirección hacia río Grande de Tárcoles. El trazado de la RN-27 corta casi perpendicularmente las líneas de flujo de varios de los principales afluentes del Tárcoles, por ejemplo la quebrada Concepción y el río Salitral entre otros (Figura 2). Es posible que los drenajes subterráneos tengan un comportamiento similar pero esto no ha sido determinado en este estudio.

La geomorfología de este sector corresponde con una zona montañosa con laderas denudacionales de origen volcánico con pendientes moderadas a fuertes con ángulos entre 8° y 35° . Estas pendientes favorecen los procesos denudacionales intensos (deslizamientos) y también son susceptibles a la erosión de suelos, la cobertura vegetal es posible, pero se dificulta una vez que ocurren deslizamientos ya que la pendiente usualmente se incrementa en las zonas afectadas y con suelos descubiertos. Las pendientes más fuertes ($35-55^\circ$) se observan en el valle fluvial del río Tárcoles (Figura 2). Los cortes realizados por el trazado de la RN-27 han generado pendientes muy fuertes, en algunos casos con ángulos $> 55^\circ$ como se describen más adelante.

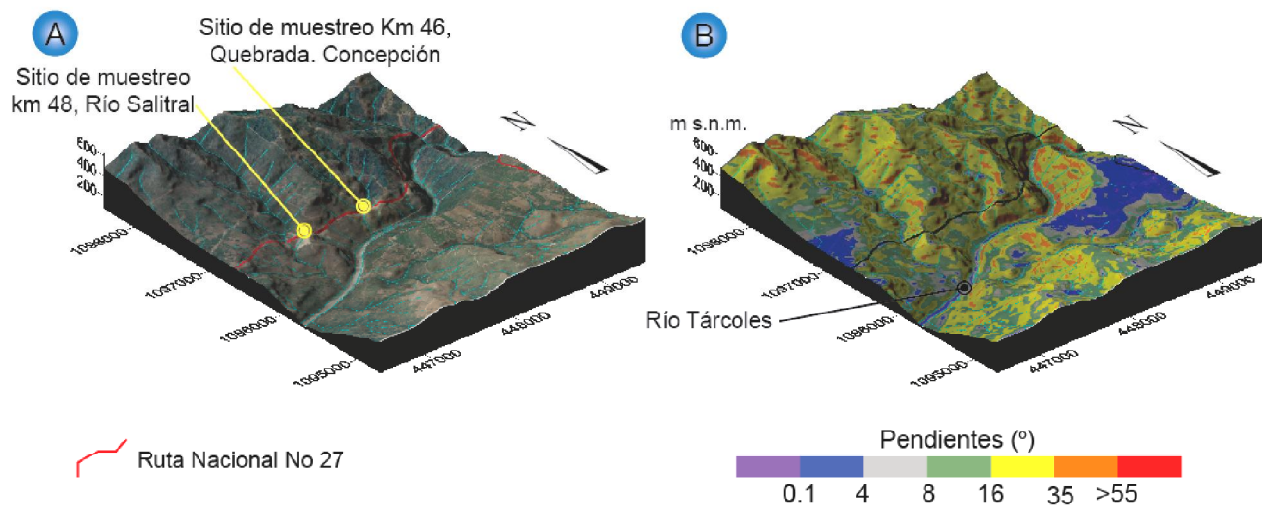


Figura 2. Modelos de elevación digital con información de la zona de estudio. A). Aparecen los sitios muestreados sobre una fotografía aérea y los drenajes de las microcuencas fluyendo hacia el río Tárcoles. B) Mapa de Pendientes de la zona de estudio, se observa como la RN-27 atraviesa una zona de pendientes moderadas $16-35^\circ$.

6. METODOLOGÍA, ALCANCES Y LIMITACIONES DEL ESTUDIO

A continuación se describe el procedimiento utilizado en este trabajo, desde la selección de los afloramientos de trabajo hasta el 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 Determinación de zonas de muestreo

Mediante visitas de campo se identificaron las zonas con taludes expuestos 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 en la RN-27. 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 (Figura 1).

6.2 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 3). A una cada una de las muestras tomadas, se le realizó una descripción litológica macroscópica, 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 substrajo cada muestra. Cada una de ellas se rotuló con un código específico y se ubicó dentro del croquis correspondiente (Figura 3). A una muestra sana de este sitio se le realizó una descripción mineralógica y petrográfica en detalle con la utilización de un microscopio petrográfico con luz polarizante, para su posterior clasificación petrográfica (Anexos).



Figura 3. Imagen aérea tomada de Google Earth® con la ubicación del sitio de donde se tomaron las muestras de roca para análisis de pH en pasta. LD = Lado derecho, LI = Lado izquierdo.

6.3 Muestreo general estacionamiento kilómetro 48 + 000

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



Figura 4. Imagen aérea tomada de Google Earth® con la ubicación del sitio de donde se tomaron las muestras de suelo en el estacionamiento 48 + 000.

6.4 Muestreo en detalle estacionamiento kilómetro 48 + 000

Durante la estación lluviosa (Agosto 2014), se muestreo en detalle una berma de talud ubicado en el estacionamiento del kilómetro 48 + 000. En esta ocasión solamente se tomaron muestras en el talud del lado izquierdo (Sentido San José - Caldera) 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 5).

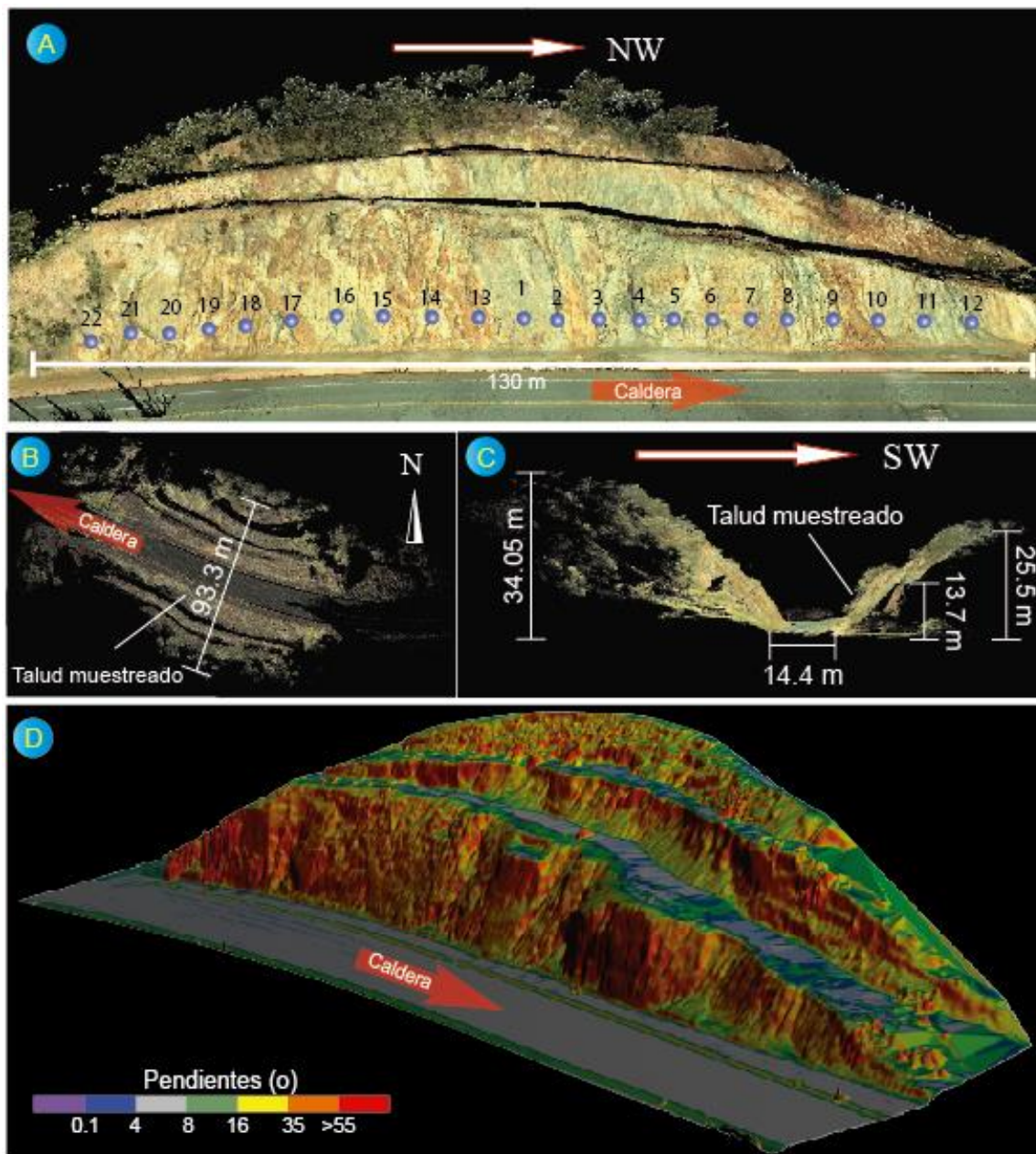


Figura 5. Las siguientes figuras fueron generadas a partir de un levantamiento topográfico que se realizó con el escáner Lídars de la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional. A) Vista de frente del talud muestreado y la ubicación de cada una de las muestras. B) Vista de planta del talud muestreado. C) Vista de perfil del talud muestreado. D) Vista oblicua del talud muestreado con las pendientes de cada una de las bermas.

6.5 Mediciones de pH de suelo y de aguas superficiales in situ estacionamiento 48 + 000

Adicionalmente a la toma de muestras de suelos, en el estacionamiento del kilómetro 48 + 000, se tomaron muestras de material fino, las cuales se mezclaron en un vaso recto beaker+de plástico con agua destilada, resultando una mezcla que se dejó reposar por 10 minutos. Después de calibrar el pH-metro con las disoluciones patrón de pH 4 y pH 7, se realizó la medición de pH. En aquellos sitios en donde se encontrara agua estancada o saliendo de los drenajes de los taludes, se hicieron mediciones de pH in situ. Se tomaron fotografías de los sitios en los cuales se realizaron las mediciones y de los resultados obtenidos mediante el pH-metro.

6.6 Mediciones de pH de suelos y rocas (pH en pasta) en el laboratorio

Las mediciones de pH de suelos se realizaron en el laboratorio de química de LanammeUCR, mientras que los análisis de pH de rocas se realizaron en el Laboratorio de Geoquímica de la Escuela Centroamericana de Geología (ECG). En ambos casos, se siguió la metodología para determinar el pH en una pasta para suelos y rocas usada en minería que es derivada de pruebas que se hacen en mediciones agrícolas (USEPA 1994). El pH en pasta proporciona 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). En general, estas mediciones consisten en tomar una cantidad determinada de material fino en el campo, luego disgregar o moler el material y tamizar con malla N^o.10 (apertura 2 mm), y descartar la fracción gruesa. Se preparan las disoluciones patrón de pH 4.0 y pH 7.0 y se calibra el pH-metro. Posteriormente se combina y se mezcla muy bien una pasta 1:1 de agua : muestra, es decir, a 20 mL de agua destilada se le agregan 20 g del material, se deja reposar por 10 minutos y se inserta el pH-metro moviendo suavemente la solución supernatante, finalmente se mide electroquímicamente el pH. Este proceso se hizo por triplicado y se tomó la mediana de las tres mediciones de cada muestra analizada.

En detalle, a cada muestra de roca seca, previamente pulverizada y tamizada en una malla de 200 μ m, se le agregaron con una probeta (20,0 \pm 0,5) mL de agua ultrapura con una resistividad de 18,2 M Ω /cm recién obtenida del purificador Direct 8 Milli-Q Millipore[®] UCR323671. Las muestras se ponen en agitación en un agitador Thermo Scientific CIMAREC[®] UCR329195 con una pastilla magnética por 10 minutos a temperatura ambiente. 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 establezca la medida. Si los resultados obtenidos de este experimento, dan un 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 y en medio acuoso sumado a la acción catalizadora de bacterias ferro-oxidantes se genera drenaje ácido de roca. 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).

6.7 Mediciones de pH y química de aguas ex situ

Se realizaron mediciones de pH del agua en algunos drenajes que descargan el líquido de los taludes de la RN-27, así como en sitios donde se encontrara agua estancada. Estas mediciones se realizaron en conjunto con el Laboratorio de Geoquímica de la Escuela Centroamericana de Geología (ECG) de la Universidad de Costa Rica. Para ciertas muestras de agua estancada, se realizaron otros análisis más detallados en el laboratorio (concentración en mg/L de fluoruros, cloruros, nitritos, nitratos, fosfatos, sulfuros, litio, sodio, amonio, potasio, calcio y magnesio, entre otros). El pH-metro que se utilizó para hacer las mediciones de pH de suelos y aguas corresponden con el siguiente equipo: Laboratorio de Química de Lanamme: Modelo Sartorius Docu, calibrado con pH de 10, 7 y 4 y con una precisión de ± 0.001 . Mientras que en el Laboratorio de Geoquímica de la Escuela Centroamericana de Geología el pH se midió con un medidor multiparamétrico Thermo Orion 5 Star® UCR297131 con un electrodo de vidrio. El equipo fue calibrado previamente con tres disoluciones patrón de pH 4.01, 7.00 y 10.01 marca Oakton® a una temperatura que osciló entre 22°C y 24°C (termómetro de mercurio en agua). La incertidumbre de cada medición es 0,01 unidades de pH. Se tomaron cerca de 20 g de suelo con una balanza analítica AND GR-200® (0,0001 g).

6.8 Alcances y limitantes

Dentro de los alcances de esta investigación se pudo identificar si en los taludes estudiados en detalle se está dando el fenómeno drenaje ácido de roca. Una limitante del presente trabajo es que solamente se muestrearon dos taludes. Para futuros trabajos se propone muestrear y analizar otros taludes en la ruta que podrían estar siendo afectados por el mismo fenómeno.

7. DRENAJE ÁCIDO DE ROCAS (DAR)

7.1 Descripción y definición

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, 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 (Figura 6). Al mismo tiempo, se liberan metales, los cuales pueden incorporarse al agua (USEPA 1994 & Dold 2010).



Figura 6. A) Afloramiento en estacionamiento (km 46 + 300), se muestra la presencia de azufre con una textura fluidal en primer plano pero también en forma de pseudoesferas o nódulos en la parte superior izquierda. B) Azufre en nódulos en afloramiento en estacionamiento (km 48+000). Este azufre posiblemente sea resultado de la oxidación del mineral pirita que también fue identificado en las rocas de estos sitios.

Su importancia radica en que el agua ácida cargada con metales disueltos deteriora significativamente la calidad del medio. Aunque el término que se ha utilizado para definirlo es drenaje ácido de mina, es preferible utilizar drenaje ácido de roca o DAR, ya que no solamente ocurre en minas. Otros sitios donde se han identificado drenaje ácido de rocas son: botaderos o escombreras de minas, depósitos de relaves o colas, tajos, túneles, sitios de acumulación de minerales lixiviados y cortes de carreteras entre otros (USEPA 1994 & Dold 2010).

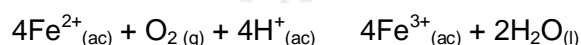
Un caso documentado de asociación de DAR con la construcción de carreteras se dio en el estado de Virginia, Estados Unidos, donde se reportó la presencia de DAR al exponer rocas bituminosas ricas en pirita, en los cortes de una carretera, Orndorff *et al.* (2004). Esta situación generó un gran número de problemas técnicos, ambientales y sociales. Los problemas técnicos estuvieron asociados a: la degradación de los materiales de construcción, la meteorización de los materiales de relleno ya que contenían sulfuros, la precipitación de sulfatos (que afecta la estabilidad estructural) y la disminución de la cobertura boscosa junto a la carretera, que incrementaron la erosión y la escorrentía de los ácidos. Las aguas superficiales presentaron una alta acidez y una gran cantidad de metales pesados, en detrimento de los ecosistemas acuáticos de la zona.

7.2 Procesos de generación de ácido sulfúrico asociados en la Ruta Nacional No 27

La generación de iones hidronio a partir de las rocas es una consecuencia de la oxidación de los minerales sulfurosos que contiene, en un proceso que consiste en varias reacciones con cinéticas distintas que dependen de la identidad del sulfuro. Por ejemplo, la marcasita y la pirita framboidal tienen una tasa de oxidación más rápida que la de la pirita cristalina, la cual se oxida lentamente (USEPA 1994). Debido a que hasta el momento solamente se ha podido identificar pirita (FeS_2) en forma cúbica en la zona estudiada de la RN-27, en este trabajo nos limitaremos a explicar en detalle la oxidación de este mineral según la información presentada por USEPA, 1994.



En este paso, el ion sulfuro es oxidado en medio acuoso para formar aniones sulfato e iones hidronio, que son los productos de disociación del ácido sulfúrico en disolución acuosa. El catión hidronio $\text{Fe}^{2+}_{(ac)}$ queda libre en disolución para seguir reaccionando. La oxidación del ion ferroso ocurre más despacio a valores de pH bajos.



A niveles de pH entre 3.5 y 4.5, la oxidación del hierro es catalizada por la bacteria *Metallogenium filamentous bacterium*. Por debajo de $\text{pH} = 3.5$ la misma reacción es realizada por la bacteria *Thiobacillus ferroxidans*. Si el ion férrico se forma en contacto con la pirita la siguiente reacción puede ocurrir, disolviendo la pirita.



Esta reacción genera más iones hidronio. La disolución de pirita por hierro férrico (Fe^{3+}), en conjunto con la oxidación del ion ferroso constituye un ciclo de disolución de pirita. El hierro férrico precipita como hierro hidratado como se indica en la siguiente reacción.



El $\text{Fe}(\text{OH})_3$ precipita y es identificable como un depósito amorfo de color amarillo, anaranjado o rojo en cauces o donde el agua se estanque, a este producto se le conoce con el nombre *yellow boy*.

El Fe^{3+} puede ayudar a oxidar otros minerales metálicos presentes en las rocas, tales como la galena, al lixiviarse los componentes de este y de otros minerales se podrían liberar elementos tóxicos como el plomo y el arsénico que son muy contaminantes para el ambiente.

7.3 Características típicas del DAR

Algunas características típicas generadas por este fenómeno son las siguientes (USEPA 1994)

- Es difícil de predecir y prevenir, sin embargo existen técnicas para determinar el potencial de generación de DAR de una zona.
- Puede permanecer latente por muchos años
- Cuando inicia, es muy difícil y extremadamente caro detenerlo (en algunos casos hasta US\$500.000 por hectárea)
- Una vez que empieza, puede aumentar paulatinamente.
- Muchas veces no se puede corregir y puede originar contaminación por muchos años.
- El DAR puede provocar contaminación a largo plazo, porque cuando inicia es muy difícil detenerlo.

7.4 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 están ocurriendo en los taludes de la RN-27, se mencionan a continuación:

- Precipitados de hierro (III) (*Yellow boy*) en las zonas de encharcamiento. Se da principalmente en sitios donde se puede acumular el agua, como en las cunetas. (Figura 7).
- Presencia de sulfatos (Yeso), en una gira de campo en el mes de mayo del 2014, se encontraron cristales milimétricos y hasta centimétricos de este tipo de mineral.
- Oxidación de sulfuros, en varios sitios se observaron rocas ricas en pirita, cerca de ellas también se encontró azufre y en varios sitios es frecuente un fuerte olor azufroso.
- Presencia de aguas ácidas con coloraciones rojizas en las zonas de encharcamiento (Figura 7).

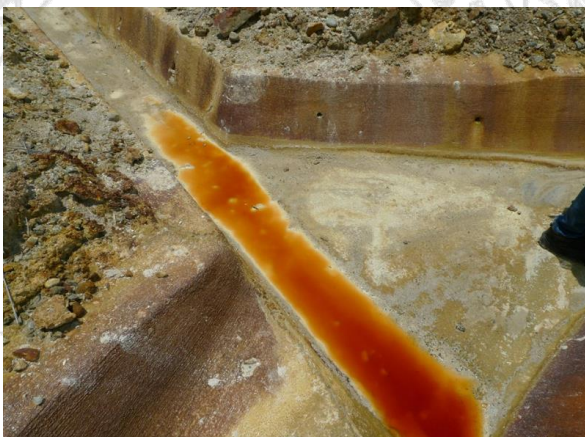


Figura 7. Acumulación de aguas con coloración rojiza en una cuneta ubicada en la segunda berma del talud lado derecho estacionamiento 48 + 000 de la Ruta Nacional No. 27. Nótense los bordes de color blancuzco producto de la reacción del componente calcáreo del cemento de la cuneta y el agua ácida.

Se han propuesto algunas clasificaciones de las aguas ácidas según su pH (USEPA, 1994, 1968, Ruíz 2004). Se tienen las siguientes categorías:

1. Altamente ácidas con pH entre 1.5 a 4.5.
2. Blandas ácidas son pH entre 3.5 a 5.5.
3. Blandas a ligeramente ácidas con pH entre 5.0 a 7.0.
4. Duras a neutras alcalinas con pH entre 7.0 a 8.5.
5. Blandas a alcalinas con pH entre 7.5 a 11.0.
6. Muy salinas con pH entre 6.0 a 9.0.

8. RESULTADOS SOBRE DETERMINACIÓN DE PRESENCIA DE DAR EN RN-27

8.1 Geología y petrografía de los sitios muestreados y analizados

Las rocas analizadas en los estacionamientos 45 + 600 y 48 + 000, corresponden con materiales de la Formación Grifo Alto (Porrás *et al*, 2012). En estos sitios, 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 o en otros casos (los menos frecuentes) han sufrido procesos de silicificación, tornándose más duras y resistentes a la meteorización y erosión. Sin embargo estos sitios no son de gran extensión. Los que si 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.

Se realizaron análisis petrográficos a cinco diferentes muestras con diferentes grados de alteración en los estacionamientos con kilometraje 45 + 600 y 48 + 000. Cuatro de ellas se identificaron como andesitas, algunas de estas con minerales secundarios (calcita, clorita verde, ceolita, hematita y piritita) producto de la misma afectación de procesos hidrotermales. La muestra restante no se pudo clasificar debido a su alto grado de alteración (Anexos).

8.2 Descripción del sitio de muestreo Km 45+600

Unos metros después del puente sobre la quebrada Concepción en sentido San José Caldera, en el kilómetro 45+600 de la RN-27, existen taludes de roca a ambos lados de la carretera. Las rocas de estos taludes presentan externamente diferentes tonalidades de color rojo, amarillo y anaranjado típicas de la oxidación de los sulfuros. Las paredes se observan muy fracturadas y permiten el paso de agua meteórica. En general presentan una pendiente > 55° e incluso en algunos puntos pendientes casi verticales. Este afloramiento tiene dimensiones de 120 m de largo y 14 m de alto a ambos lados de la ruta (Figuras 3 y 8).

La roca sana expuesta presenta colores grises claros, de textura afanítica porfírica con cristales de plagioclasa de 2 mm promedio en un 15 % en una matriz gris de grano fino en un 81 %, presenta minerales de alteración como, sulfuros (probablemente pirita) en un 2 % (preferentemente oxidados) y óxidos de manganeso en un 2%, la mayoría de las plagioclasas se encuentra alterada a calcita (algunas reaccionan con HCl al 10%), mucha de la superficie de la roca está cubierta por una pátina de tonos rojizos, anaranjados y amarillos de no más de 3 mm.



Figura 8. Vista del talud de roca lado derecho, muestreado para determinar el pH en una pasta de roca en el estacionamiento 45+600. Nótese las coloraciones rojizas en las rocas del talud. Al fondo se observa el talud rocoso cubierto por concreto lanzado.

8.3 Resultados de las mediciones de pH en pasta 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 Escuela Centroamericana de Geología. Estos se resumen en el cuadro 1 y se muestran en la figura 9.

Cuadro 1. Resultados de muestras analizadas en Mayo 2014 de taludes en estacionamiento km 45+600 de la Ruta Nacional No. 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

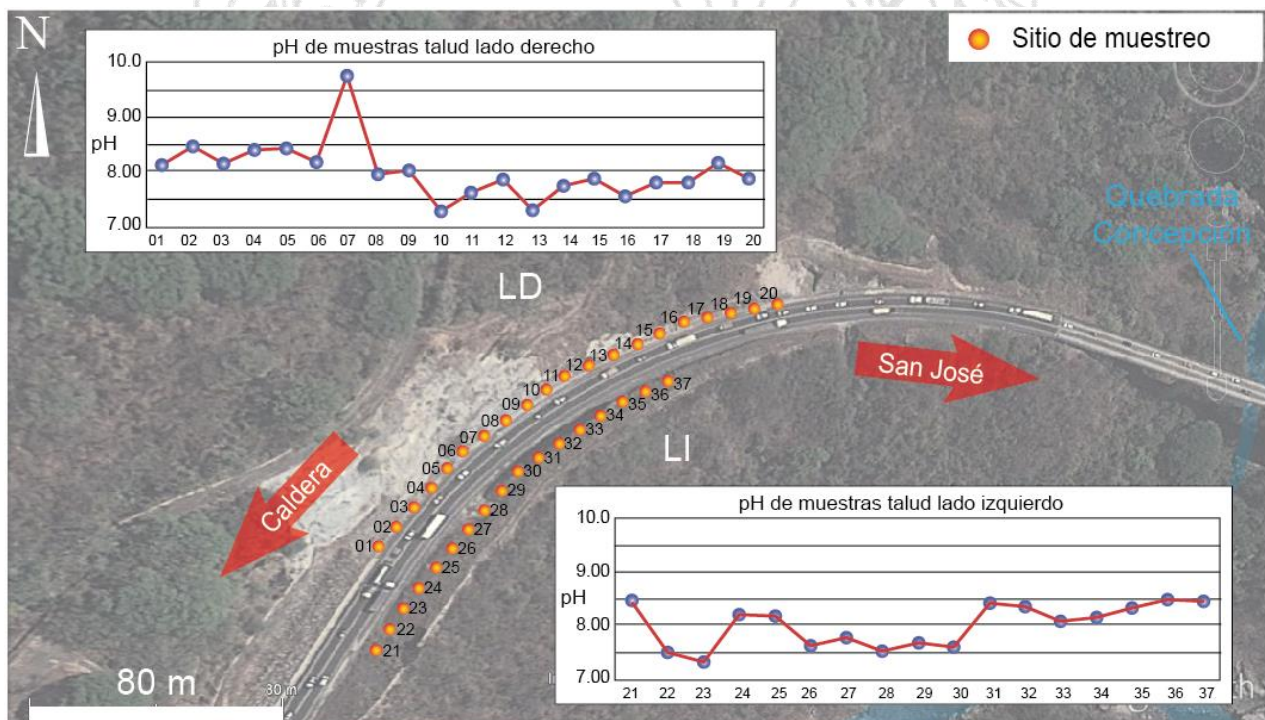


Figura 9. Resultados de la determinación de pH en pasta realizados a las rocas ubicadas en los taludes rocosos del estacionamiento 45 + 600. Como se observa, todas las muestras presentan valores de pH superiores a 7

Según los resultados obtenidos, las rocas de este sitio a pesar de tener una coloración rojiza en su parte externa, no están generando drenaje ácido de roca. 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 con el microscopio 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 patina rojiza que presentan en la parte externa 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 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.

8.4 Descripción del sitio de muestreo Km 48 +000

En el estacionamiento ubicado en el kilometraje 48+000 se ubican dos taludes de roca alterada y suelos residuales, uno al lado derecho y otro al lado izquierdo de la vía según el sentido San José Caldera. El talud del LD tiene una altura máxima de 34.05 m, y está compuesto por al menos 5 bermas con espacios para contra cunetas mientras que el talud del LI tiene una altura máxima de 25.5 m (Figura 5).

Los taludes a ambos lados de la carretera presentan material poco consolidado con diferentes tonalidades (rojizas amarillentas) y grados de alteración (desde poco alterada hasta completamente alterada). En los sitios donde la roca está menos alterada, la matriz presenta tonalidades de color gris claro, es posible observar algunos fenocristales de plagioclasas. Las tonalidades rojizas, anaranjadas, moradas y blancuzcas están asociadas con zonas de fracturamiento intenso y zonas de falla (Figura 9). En un plano de falla en el talud izquierdo se pudo observar azufre en las estrías de falla y en otro sitio se observó esferas centimétricas de este mineral, las rocas de este sitio son ricas en cristales de pirita (> 40%) que se puede observar a simple vista (Figura 6 B).



Figura 9. Talud en el kilómetro 48+000 de la Ruta 27 San José-Caldera. Se observan las fracturas y diferentes tonalidades de las rocas alteradas. La parte de color gris corresponde con una zona de alteración críptica, ya que parece estar sana a simple vista pero en realidad está muy alterada y presenta cristales de pirita.

En este sitio, en una primera fase de muestreo en el mes de mayo del 2014 (inicio de estación lluviosa), se tomaron 36 muestras de suelo de forma sistemática siguiendo un orden previamente establecido que sigue cuadrantes con distanciamiento entre las muestras de unos 20 m aproximadamente (Figura 4).

Posteriormente en una segunda fase de muestreo a finales de agosto del mismo año, se realizó un levantamiento de muestras distanciadas cada 2 metros entre sí a lo largo de una zona de 130 m aproximadamente (Figura 5).

8.5 Resultados de mediciones muestreo general 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 de LanammeUCR. En el cuadro 2 se resumen los resultados estadísticos más importantes del experimento.

Cuadro 2. Resultados de muestras analizadas en Mayo 2014 Ruta 27, talud km 48+000

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 $<$ a 5.35, por lo que según la clasificación de USEPA, 1994, se podrían agrupar entre altamente acidas y blandas acidas. 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 y la mayoría presentan una acidez similar a la del ácido gástrico o ácido de batería (Figura 10).

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 de cuadrante y alejándose del núcleo del talud presentan los valores más altos de pH, sin embargo todas presentan valores por debajo del pH neutro (Figura 11).

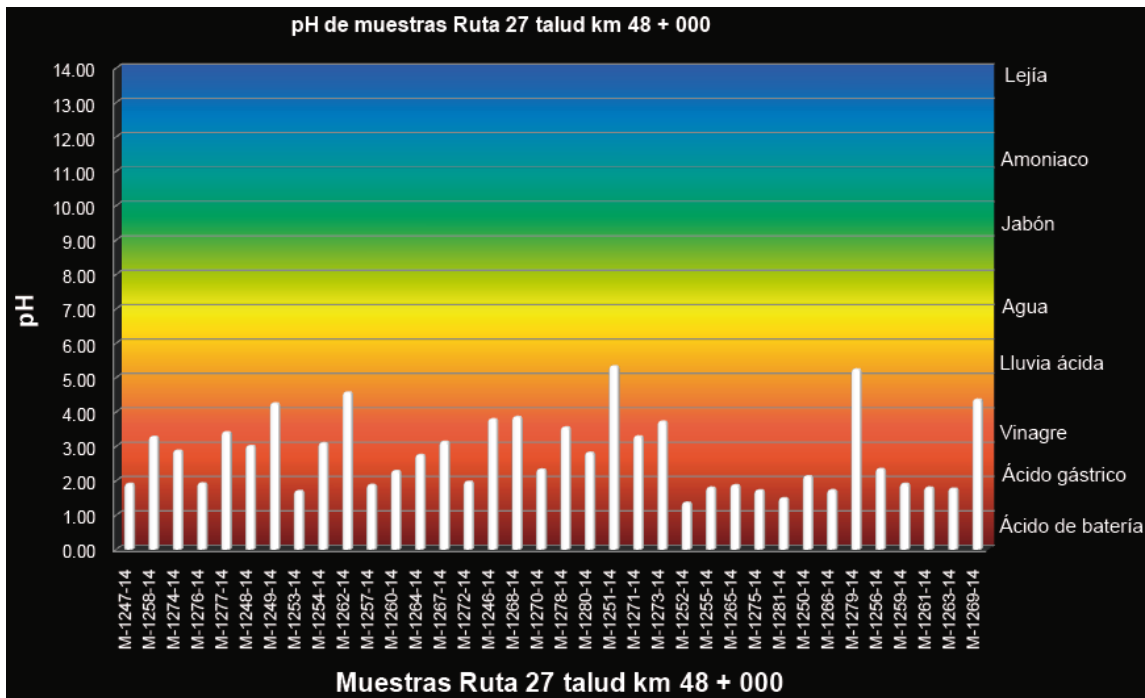


Figura 10. Comparación de resultados de pH obtenidos en muestras de Mayo 2014 en la Ruta 27 talud de estacionamiento del km 48 + 000 y otras sustancias. Todas las muestras analizadas del talud presentan un pH más bajo que el que está presente en la lluvia ácida.

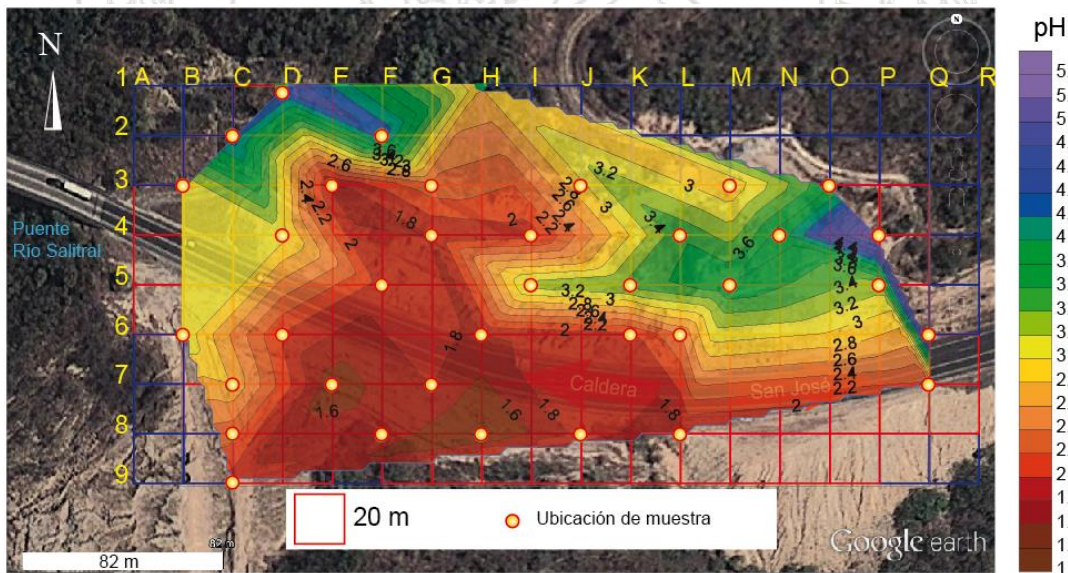


Figura 11. Resultados de muestreo general de suelos en talud de estacionamiento 48 + 000, la distribución de la curvas se realizó con una interpolación de tipo triangulación lineal.

En la parte central del talud se encontraron fracturas y varios planos de falla. En base a 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 a la ubicación de esta zona de falla. Sin embargo como se describe más adelante, el muestreo en detalle del talud mostro 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.

8.6 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. Los resultados analíticos se muestran en el cuadro 3.

Cuadro 3. Resultados de muestras analizadas en Agosto 2014 Ruta 27, talud km 48+000

Muestras analizadas	22
Temperatura promedio del agua durante mediciones	24.2° C
Valor más bajo de pH	1.52
Valor más alto de pH	3.31
Valor promedio	1.8

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 de 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 realizo el muestreo general del sitio en el mes de mayo, cuando las lluvias apenas inician y la movilidad de los fluidos lixiviados no era tan alta.

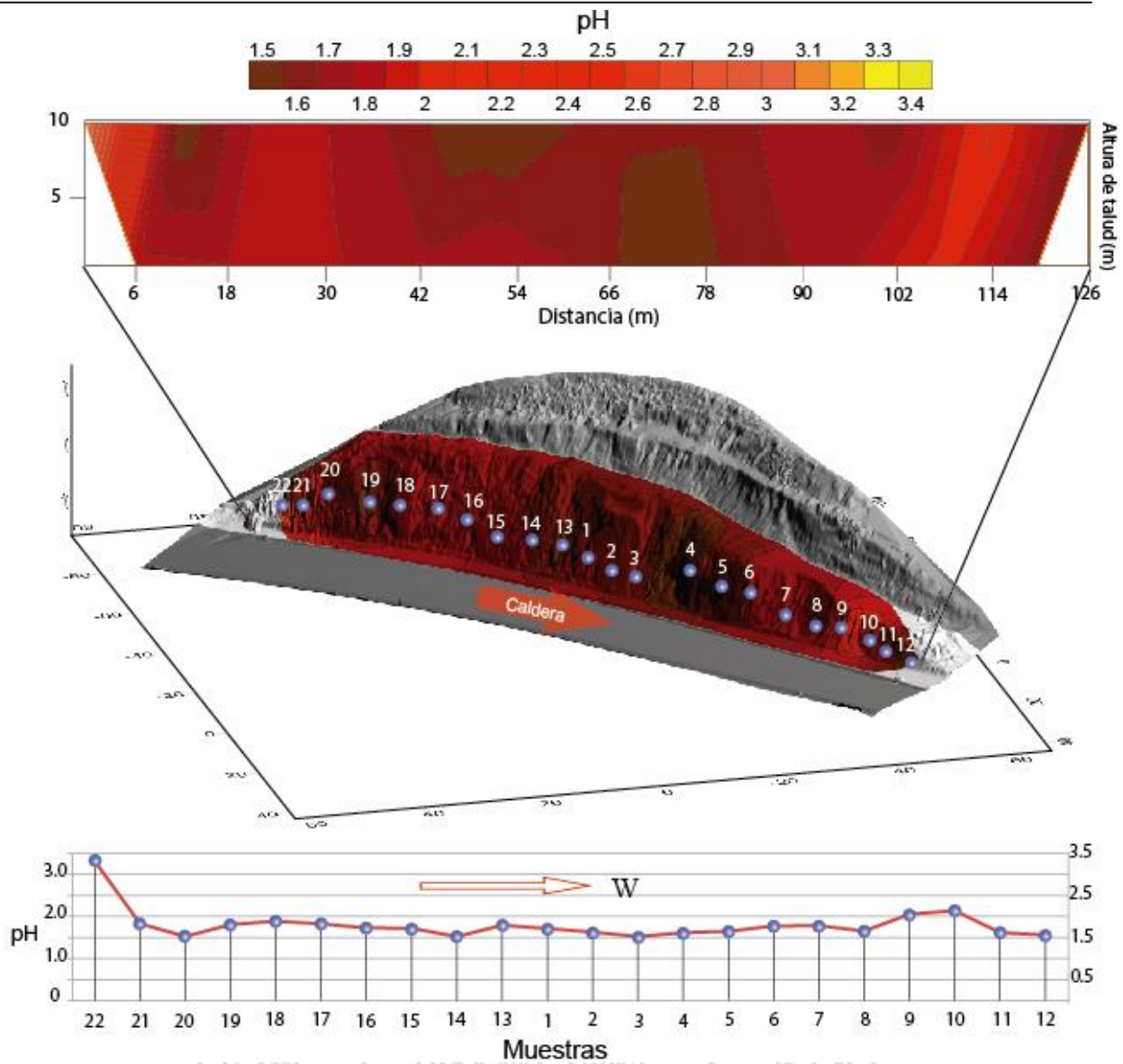


Figura 12. Distribución de pH en los suelos y rocas tomadas de la parte inferior del LI del talud en el estacionamiento del kilómetro 48 + 000. Nótese como la variación es muy poca y casi todas las muestras presentan valores de pH inferiores a 2.

8.7 Resultados de análisis de pH y química de aguas en laboratorio

Se procedió a tomar muestras de agua en los estacionamientos km 21+400 y en el 48+000 para establecer principalmente su pH, además de otros parámetros como conductividad eléctrica oxígeno disuelto, potencial de óxido reducción y temperatura. La muestra del kilómetro 21 + 400 se tomó en un sitio donde no hay evidencias de alteración hidrotermal o DAR, así se tiene una mejor comparación de la acidez y la química de un sitio afectado por DAR y uno donde no se da este proceso (Cuadro 4). A continuación se presentan las observaciones sobre estos resultados.

Observaciones:

- Las muestras de agua fueron tomadas el día 20 de octubre del 2014 en botellas de polietileno y se transportaron en frío hasta el laboratorio donde se conservaron a 7°C hasta el momento del análisis.
- El pH, la temperatura (T), la conductividad eléctrica (Cond.), el oxígeno disuelto (OD) y el potencial de óxido reducción (ORP) se midieron in situ con un medidor multiparamétrico Thermo Orion 5 Star® UCR321339. Previamente calibrado a una temperatura que osciló entre 22°C y 24°C (termómetro de mercurio en agua) con los siguientes patrones: pH 4,01; pH 7,00; pH 10,01; 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$; 12,88 mS/cm; todos marca Oakton®; 240 mV marca HI7021 HANNA®; patrón zero oxígeno marca HI7040 HANNA®.
- La medición in situ del ORP mostró mucha inestabilidad.
- La muestra R03 (km 48+000) es de un intenso color rojo y forma un precipitado al diluirla, probablemente por el aumento en el pH.
- Los análisis ex situ se hicieron en el Laboratorio de Geoquímica, Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica.
- La alcalinidad se hizo el 12 de diciembre del 2014, por volumetría usando fenoftaleína y anaranjado de metilo como indicadores. En la muestra R03 (km 48+000) no pudo ser determinada la alcalinidad en parte por el color intenso de la muestra y en parte porque por su bajo pH. Se intentó valorar la muestra con hidróxido de sodio y fenolftaleína pero nuevamente el color y la formación de un precipitado impidieron el análisis.
- Las concentraciones de iones se determinaron por cromatografía iónica con detector de conductividad con equipos Metrohm 881 Compact IC Pro® UCR306364 y UCR313765, el 5 y 6 de noviembre del 2014. Los valores de dureza se estimaron a partir de las concentraciones de calcio y magnesio. El análisis cromatográfico no pudo ser confirmado porque la muestra R03, dañó la resina de intercambio iónico de la columna cromatográfica, posiblemente por la formación de un precipitado.
- La densidad se hizo el 12 de diciembre del 2014 por el método del picnómetro con una balanza Sartorius Cubis® 350141.

Cuadro 4. Resultados geoquímicos del análisis de muestras de agua en la RN-27.

N° LGQ		LGQ141020-01	LGQ141020-02
Código original		Q01	R03
Fecha de toma	(dd/mm/aa)	20/10/2014	20/10/2014
Estacionamiento		km 21+400	km 48+000
Temperatura	°C	29,7 ± 0,1	38,2 ± 0,1
pH	pH	7,78 ± 0,01	1,53 ± 0,01
Cond.	µS/cm	287,5 ± 0,1	17485 ± 1
OD	mg/L	7,0 ± 0,1	0,71 ± 0,1
ORP	mV	70 ± 10	428 ± 20
Litio	mg/L	< 0,009	< 0,9
Sodio	mg/L	17,4 ± 0,4	32 ± 4
Amonio	mg/L	< 0,04	12 ± 3
Potasio	mg/L	1,13 ± 0,06	1,8 ± 0,6
Calcio	mg/L	52,3 ± 0,8	672 ± 6
Magnesio	mg/L	1,20 ± 0,04	590 ± 3
Fluoruro	mg/L	0,22 ± 0,09	71 ± 8
Cloruro	mg/L	1,02 ± 0,05	8 ± 2
Nitrito	mg/L	< 0,6	< 57
Nitrato	mg/L	< 0,6	< 66
Fosfato	mg/L	< 2	< 190
Sulfato	mg/L	16,3 ± 0,5	(40 ± 1) × 1000
Dureza cálcica	mg/L CaCO ₃	131	1678
Dureza magnésica	mg/L CaCO ₃	5	2430
Dureza total	mg/L CaCO ₃	136	4108
Alcalinidad OH/CO ₃	mg/L CaCO ₃	< 1	no se midió
Alcalinidad HCO ₃	mg/L CaCO ₃	268	no se midió
Alcalinidad total	mg/L CaCO ₃	268	no se midió
Carbonatos	mg/L	< 1	no se midió
Bicarbonatos	mg/L	164	no se midió
Densidad	g/mL	0,998	1,041

Estos resultados muestran la disparidad entre ambas muestras de agua. La muestra del estacionamiento km 48+000 es más ácida, más cálida, más anóxica, con mayor conductividad eléctrica y es más concentrada en todos los iones mayores, excepto para el potasio; su bajo pH medido es debido a una alta concentración de iones hidronio ($10^{-1.53} \text{ M} \approx 0,03 \text{ mol/L}$) que implica una reducción en la presencia iones carbonato libres y quizá también la de los iones hidrógenocarbonato, por lo que el principal anión es el sulfato (40 g/L), consistente con la oxidación del sulfuro de la pirita de las rocas; los cationes más abundantes son el Mg^{2+} y el Ca^{2+} que le dan mayor dureza a esas aguas y son más susceptibles de tener índices de saturación altos para los sulfatos de magnesio y calcio, los cuales que pueden precipitar si aumenta el pH, baja la temperatura, se diluye la muestra o si ocurre una combinación de los tres. No se hizo determinaciones de la concentración de hierro en el agua pero el color de la muestra (rojo intenso) y la pátina que recubre los alrededores delata su presencia, la reducida concentración de oxígeno disuelto hace pensar que la especie predominante sea el $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ o algún otro complejo análogo de hierro-II, sin descartar la presencia de hierro-III en disolución favorecida por el bajo nivel de pH. En contraste la muestra del estacionamiento km 21+400 es ligeramente básica, fría, incolora, diluida y con condiciones oxidantes, fue tomada en un sitio donde la roca tenía una color grisáceo. Sin otra información adicional, podría suponerse que la muestra del estacionamiento km 21+400 tiene poca influencia de un drenaje ácido de rocas en comparación con la muestra de agua del estacionamiento km 48+000.

8.9 Efectos y peligrosidad del drenaje ácido de rocas en la Ruta Nacional No. 27

En el ambiente, el drenaje ácido de roca puede originar la desaparición de la vida acuática o la contaminación de los ecosistemas pues si aumentan las concentraciones de elementos tóxicos en el agua, puede favorecerse la bioacumulación en los tejidos de los organismos y la biomagnificación a través de la cadena trófica. El incremento en la concentración de elementos tóxicos en el organismo puede producir enfermedades degenerativas, deformaciones genéticas y cáncer (USEPA 1994). El agua contaminada con ciertos metales tóxicos es muy difícil de tratar. Aparte de los problemas ambientales, el drenaje ácido puede ocasionar deterioro de estructuras metálicas o de concreto, tal y como está sucediendo en la RN-27.

Hay otros sitios en la RN-27 que presentan indicios de estar siendo afectados por DAR como el identificado en el estacionamiento 48 + 000, algunos de ellos se describen en detalle más adelante. Las mayores afectaciones observadas, se dan en las estructuras de concreto y 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 (Figura 13 y 14). Lo mismo ocurre con las contracunetas colocadas en la parte superior de las bermas y taludes. El concreto lanzado sobre los taludes, presenta los mismos problemas, con el agravante de que al estar colocados sobre los taludes se pueden desprender y afectar a los usuarios de esta ruta. Las varillas de acero, pernos y anclajes sufren inicialmente oxidación en sus partes externas que con el paso del tiempo se convierte en corrosión, hasta degradar completamente el acero (Figura 13 y 14).



Figura 13. A.) Pared de concreto lanzado con tonalidades naranjas generadas por óxidos de hierro y manganeso. B.) Cunetas colapsadas por flujos de agua ácida, además se observa la parte inferior del talud resquebrajada. Ambas imágenes corresponden al estacionamiento Kilómetro 37+700.



Figura 14. A.) Exposición de acero corroído por fracturas en el concreto lanzado. B) Se observan patinas de óxidos de hierro sobre el concreto lanzado, están asociadas con las salidas de agua de los drenajes y las fracturas. En la cuneta también se puede apreciar la presencia de este tipo de coloraciones. Estas fotografías corresponden con el estacionamiento del Kilómetro 45+800.

8.10 Medición de pH in situ de aguas y problemas identificados atribuidos a DAR

Se presentan los resultados de mediciones de pH de aguas superficiales en varios sitios de la RN-27 y problemas observados en varios taludes que se pueden atribuir a efectos de DAR. Es recomendable realizar pruebas de pH en pasta en estos taludes para comprobar y determinar la intensidad del drenaje que se está dando en estos puntos.

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 lava el material más fino y suelos del talud, lo cual ha ocasionado inestabilidad al talud y hace que el concreto se resquebraje aun más (Figura 13).

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 electro-soldadas está expuesto. El acero se presenta con oxidación y corrosión intensa (Figura 13).

Una medición de pH in situ de las aguas que fluyen en la parte inferior del talud, dio como resultado 5.5, (similar a lluvia ácida). Se considera que las características tan desfavorables presentes en el concreto lanzado y el acero de la malla electro-soldada 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 (Figuras 14 y 15).



Figura 15. A) Concreto lanzado con patinas 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.

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 16). 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 porque 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.

Prueba de pH de agua in situ



Prueba de pH en pasta in situ



Figura 16. 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. C.) Muestra de roca alterada con presencia de azufre, con la cual se generó la pasta a la que se le hicieron las mediciones de pH. D.) Resultados de medición de pH de pasta (2.1)

9. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos en este trabajo, se logró determinar que hay sitios a lo largo de la RN-27 donde se está dando drenaje ácido de roca. Esta situación afecta directamente las propiedades físicas del concreto lanzado y las cunetas construidas para el manejo de aguas superficiales, ocasionando su colapso y generando un peligro para los usuarios. Hay sitios que presentaban indicios de DAR como patinas de óxidos de hierro, pero los análisis realizados en el laboratorio dieron 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 para así poder confirmarlo o descartarlo.

El talud rocoso ubicado en el estacionamiento 45 + 600, no presenta DAR. 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 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 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 del sitio.

10. RECOMENDACIONES

10.1 Recomendaciones generales

Identificar todos los taludes de la RN-27 que presentan indicios 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.

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.

10.2 Recomendaciones estacionamiento 45 + 600

Debido a que 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 patinas 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.

10.3 Recomendaciones 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 la 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 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. 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.

11. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a las personas que participaron en distintas fases de este informe, especialmente durante el levantamiento de datos, y los análisis de laboratorio. Alejandro Arauz (geólogo ambiental) en la determinación de los sitios de muestreo. Fabian Elizondo (Coordinador de laboratorios de LanammeUCR). Marcia Cordero por compartir las descripciones delgadas del estacionamiento del km 48 +000. Stephanie Murillo (Geóloga ECG) y Jairo García (químico de la ECG) por facilitarnos el Laboratorio de Geoquímica de la ECG. Jorge Aguilar, Aristides Alfaro, Julio Duarte, Francisco Murillo, Javier Oviedo, Ariel Sedo, Leonardo Vargas, Giorgi Villalobos (Geólogos del curso de Licenciatura - Geoquímica Aplicada de la ECG) por la recolección de muestras y análisis en los laboratorios, Carolina Suarez y Karen Herrera asistentes de ingeniería y geología de la Unidad de Evaluación de la Red Vial Nacional quienes participaron en varios fases de la investigación.

12. 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. Publicación AGC.0110 San José Costa Rica. 49 pp.
- BLOWES, D., PTACEK, C., JAMBOR, J. & WEISNER, C. (2003): The Geochemistry of Acid Mine Drainage.- Treatise on Geochemistry 9:149-204.

- 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.
- HOLDRIDGE, L. R., 1967: Life zone ecology. . Tropical Science Center. San José, Costa Rica. 206 pp.
- 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/1_1_Anexo%20XI%20Linea%20Base%20Geoquimica.pdf
- ORNDORFF, Z., DANIELS, L. & DIAS, L. (2004): Evaluation of sulfidic materials in Virginia Highway corridors.- Environmental Geology 46:209-216.
- 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. Amer. Central, 47: 69-93.
- 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 Bessemer-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.
- RUÍZ, 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.].
- Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (UGERVN) LanammeUCR, 2014: Informe de Evaluación del Proyecto San José - Caldera Ruta Nacional 27 Año 2013 - 2014, San José Costa Rica. 167 pp.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA) Office Of Solid Waste Special Waste Branch. 1994: Technical Document Acid Mine Drainage Prediction. Epa530-R94-036 Ntis Pb94-201829. 52 pp.

13 ANEXOS

Cuadro 6.
Composición petrográfica de muestras en la zona de estudio

Código	Coordenadas CRTM-2005	Descripción microscópica	Clasificación	Unidad/Formación	Figura
R27-1	447638,535 E 1096562,815 N	Textura holocristalina porfírica. Matriz (72%), recristalizada compuesta de cuarzo secundario, arcillas, óxidos de hierro y opacos. Fenocristales (23%), plagioclasa (13%) hipidiomórfica, opacos (5%), anfíboles (5%) alterados a arcillas. Minerales de alteración: cuarzo secundario (rellenando cavidades), arcillas (altera feldespatos y ferromagnesianos), óxidos de hierro, sericita, ceolita y epidota (<1%). Otros rasgos: vesículas (2%), amígdalas (3%), vetillas de arcillas y microfracturas.	Andesita recristalizada	Grifo Alto	17
R27-2	447608,115 E 1096593,572 N	Textura holocristalina porfírica. Matriz (73%), recristalizada compuesta de cuarzo secundario, arcillas, óxidos de hierro y opacos. Fenocristales (25%), plagioclasa (18%) hipidiomórficas, opacos (2%), ferromagnesianos alterados (5%) con olivinos alterados a serpentina y arcilla. Minerales de alteración: calcita, sericita (alterando feldespatos), cuarzo secundario (rellenando cavidades), óxidos de hierro, arcillas, serpentina (alterando olivino), titanita (traza). Otros rasgos: amígdalas (2%) rellenas de filosilicatos o calcita.	Andesita recristalizada	Grifo Alto	18
R27-5	447638,623 E 1096624,253 N	Textura granoblástica con granos. Fenocristales de cuarzo xenomórfico y contactos saturados, óxidos de hierro diseminados con forma de bandas, manchas y vetillas, sericita diseminada entre granos de cuarzo, posibles minerales ferromagnesianos (3%) hipidiomórficos alterados, arcillas diseminadas. Minerales de alteración: óxidos de hierro, arcilla Otros rasgos: vetillas, vesículas, amígdalas. Cuarzo, sericita y óxidos de hierro dispersos en toda la muestra.	No se puede determinar	Grifo Alto	19
R27-7	447608,159E 1096624,297N	Textura hipocristalina glomeroporfírica seriada. Matriz (41%), intersertal compuesta por feldespatos, piroxenos, opacos, arcillas y vidrio. Fenocristales (48%), plagioclasa (30%) hipidiomórficos con zonación, textura cribosa y fracturas rellenas de calcita, opacos (4%) cristales reabsorbidos, augita (8%) hipidiomórficos alteradas por arcillas y con fracturas rellenas de calcita, diópsido (6%) hipidiomórficos algunos con inclusiones de opacos y plagioclasa y bordes de corona. Minerales de alteración (10%): calcita (8%) alterando feldespatos, sericita (2%) alterando plagioclasas, arcillas alterando feldespatos, óxidos de hierro y epidota. Minerales accesorios (<1%): apatito. Otros rasgos: amígdalas (1%), vetillas, autolito y cumulito.	Andesita con augita y diópsido	Grifo Alto	20
M1-45+600	449185,331 E 1097357,046 N	Textura holocristalina porfírica. Matriz (60%), pilotaxítica compuesta de microlitos de plagioclasa como único mineral reconocible. Fenocristales (25%), plagioclasa (25%) hipidiomórficos con zonación continua. Minerales de alteración (14%): calcita (sustituyendo las plagioclasas en un 15%), pirita (5%), hematita (3%), clorita verde (4%) y ceolita (2%). Minerales accesorios (>1%), apatito y zircón.	Andesita	Grifo Alto	21

A continuación se muestran fotografías de las secciones delgadas de analizadas.

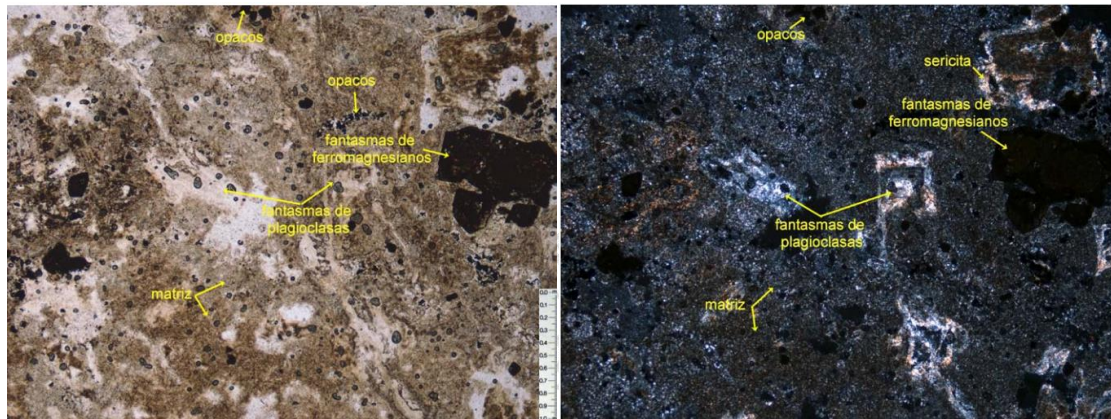


Figura 17. Composición petrográfica de la muestra R27-1 en Nícoles Paralelos y Nícoles Cruzados.

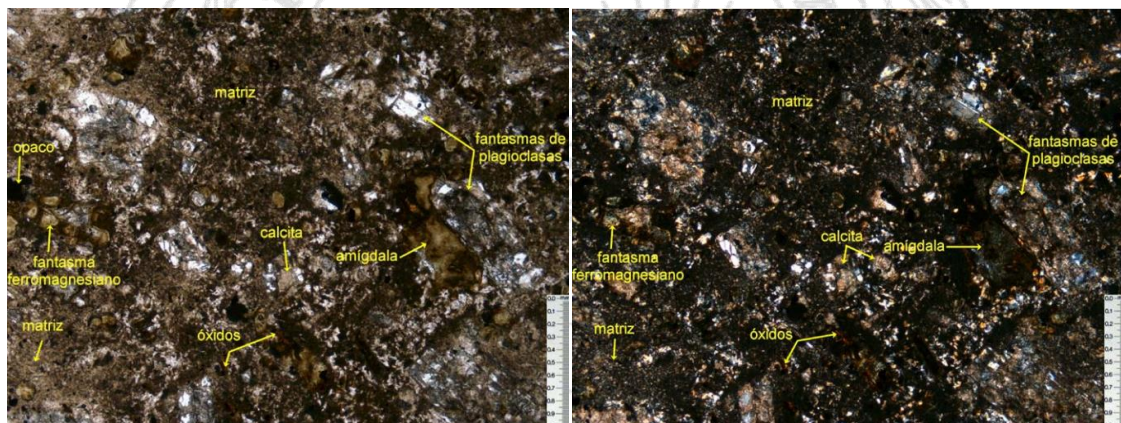


Figura 18. Composición petrográfica de la muestra R27-2 en Nícoles Paralelos y Nícoles Cruzados.

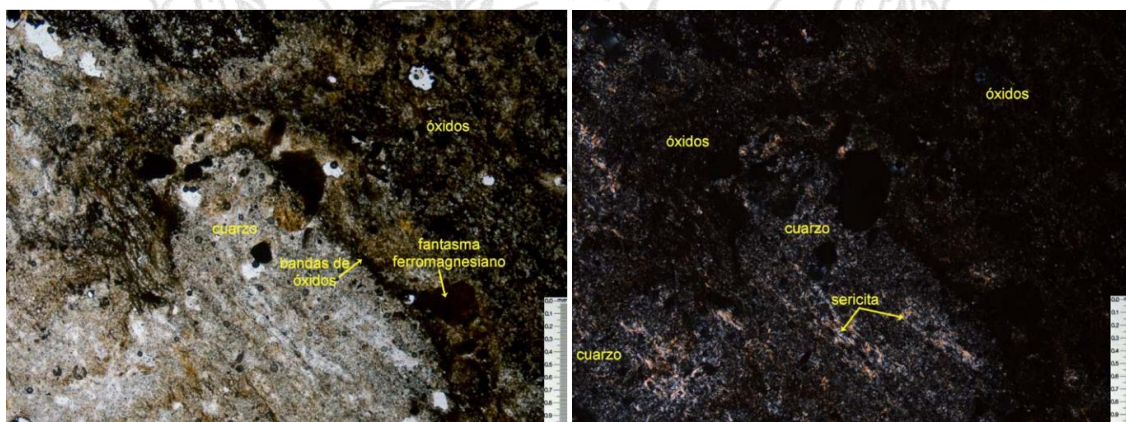


Figura 19. Composición petrográfica de la muestra R27-5 en Nícoles Paralelos y Nícoles Cruzados.

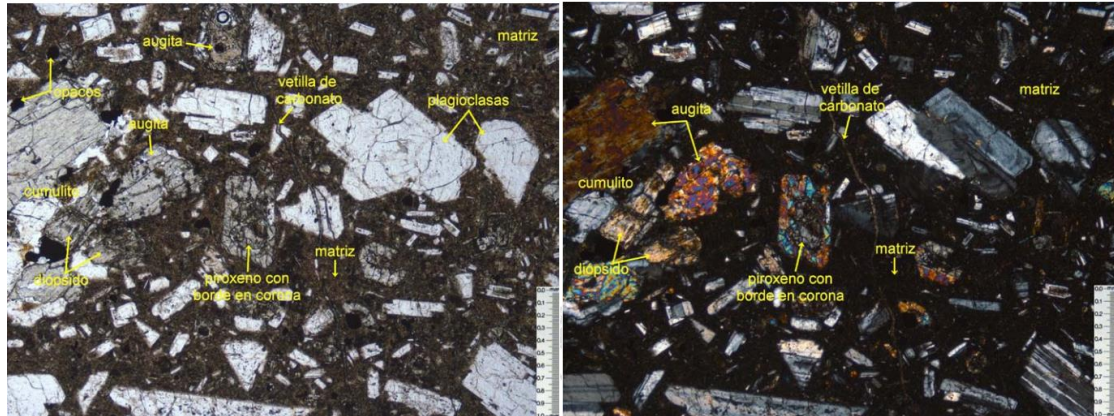


Figura 20. Composición petrográfica de la muestra R27-7 en Nicoles Paralelos y Nicoles Cruzados.

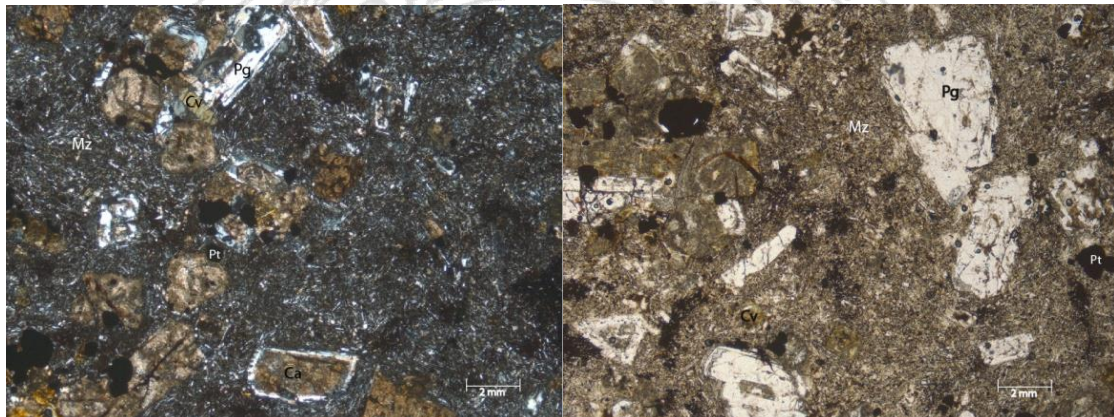


Figura 21. Composición petrográfica de la muestra M1-45+600 en Nicoles Cruzados y Nicoles Paralelos

