

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ciencias
Escuela Centroamericana de Geología

**CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA E IDENTIFICACIÓN DE DRENAJE
ÁCIDO DE ROCA EN SITIOS SELECCIONADOS ENTRE EL km 37 Y EL
km 48 EN LA RUTA NACIONAL 27**

Práctica Dirigida sometida a la consideración del Tribunal Examinador de la Escuela
Centroamericana de Geología para optar al grado de Licenciatura

Jorge E. Aguilar Chavarría

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio
Costa Rica

Noviembre 2017

Tesis sometida y aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Licenciatura en Geología y el Comité Evaluador de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar por el grado académico de Licenciado en Geología

TRIBUNAL EXAMINADOR



Dr. Pablo Ruiz C.
Director



MSc. Stephanie Murillo M.
Co-directora



MSc. Jairo García C.
Co-director



MSc. Giovanni Peraldo H.
Lector



Dr. Mauricio Mora F.
Director Escuela de Geología



Jorge E. Aguilar Chavarría
Postulante

A don Jorge y doña Marta.

*“Habla conmigo, viejo perro blanco,
habla conmigo, ladra tu quebranto...
cuando quieras, olvidarlo...
tu quebranto...”*

*Habla conmigo, perro de la lluvia...
habla conmigo, solo tú conoces,
la vendimia... de la calle...*

¡La delicia! ¡La delicia!

*Habla conmigo, viejo perro blanco,
busca descanso, con tu molinete,
que los amos, no descansan...
ya no existen...*

*Habla conmigo, perro de la lluvia,
habla conmigo, niño condenado,
por el diablo de febrero...*

¡Perdonado...Perdonado!”

Luis Alberto Spinetta, Invisible
Niño Condenado
El jardín de los presentes

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis directores de tesis por sus ideas, correcciones, discusiones, sugerencias y puntos de vista sobre el proyecto. A Pablo Ruiz por su enorme colaboración y paciencia para que este proyecto se llevara a cabo, tanto en ayuda logística como en colaboración durante el inicio, desarrollo y conclusión de esta investigación. A Stephanie Murillo por la revisión de secciones delgadas. A Jairo García por su revisión en el sustento químico-estadístico de este proyecto, así como en el soporte en el laboratorio de Geoquímica. A Oscar Lucke por su colaboración para procesamiento de las muestras en el Laboratorio de Petrografía. A Geovanny Peraldo por sus observaciones del texto.

Al personal de la Escuela Centroamericana de Geología que colaboró en este proyecto.

Al personal de LanammeUCR por el apoyo logístico para las giras de campo y procesamiento de datos Lidar para generar las imágenes en 2D y 3D.

Muchas gracias a Pablo Jimenez y Alfredo Cordoba de la Municipalidad de San Carlos, por su comprensión y colaboración con tiempo para la culminación de este proyecto.

Gracias a André Quirós de fotosaereascr.com, por brindar gratuitamente fotografías aéreas tomadas previo a la apertura de la Ruta Nacional 27.

Gracias a mi Familia. A Evelyn Rodriguez mi pareja, por su constante motivación, acompañamiento a giras de campo, discusiones científicas, colaboración en figuras y su gran tolerancia, sin lo cual no hubiese sido posible terminar este proyecto. A mis padres por su apoyo, colaboración y estimulación durante este proceso. Reconozco y agradezco su ayuda económica y entusiasmo a mi persona, para estudiar una carrera desconocida por ellos. A mis hermanos Daniel y Natalia por su apoyo.

Gracias a mis colegas Eduardo Rojas y Roberto Santamaría por su colaboración desinteresada en giras de campo, observaciones y toma de muestras.

Contenido

Índice de Figuras.....	viii
Índice de Cuadros	xiv
Resumen.....	xv
Abreviaturas.....	xvii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Definiciones	3
1.2. Justificación	5
1.3. Alcances.....	6
1.4. Importancia de este trabajo	7
1.5. Problema	10
1.6. Hipótesis de trabajo de la práctica dirigida.....	10
1.7. Objetivos.....	11
1.7.1 Objetivo General.....	11
1.7.2 Objetivos específicos	11
1.8. Ubicación de la zona de estudio	11
2. MARCO TEÓRICO	14
2.1 Procesos de generación de ácido sulfúrico	15
2.2 Características típicas del DAR	17
3. METODOLOGÍA	18
3.1 Revisión bibliográfica.....	19
3.2 Definición de zona de estudio y sitios de interés.....	19
3.3 Caracterización geomorfológica, geológica y tectónica	22
3.4 Muestreo en detalle de taludes.....	23
3.5 Revisión de impacto de DAR en obras de concreto	24
3.6 Levantamiento topográfico de los sitios de interés por parte de LanammeUCR .	25
3.7 Preparación de muestras en Laboratorio de Petrografía	26
3.8 Medición de pH en pasta en Laboratorio de Geoquímica	27
4. RESULTADOS-CONTEXTO GEOLÓGICO TECTÓNICO.....	29
4.1 Caracterización geomorfológica regional	29
4.1.2 Caracterización geomorfológica local	30

4.2 Caracterización geológica regional.....	36
4.2.1 Caracterización geológica local.....	38
4.3 Caracterización tectónica regional.....	42
4.3.1 Caracterización tectónica local.....	46
5 ANÁLISIS ESPECÍFICO POR TALUD. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS, GEOLÓGICOS-PETROGRÁFICOS, MINERALÓGICOS, DETERMINACIÓN DE pH EN PASTA Y AFECTACIÓN DE OBRAS DE CONCRETO.....	48
5.1 Estacionamiento del km 38+600.....	48
5.1.1 Morfología.....	50
5.1.2 Geología.....	53
5.1.3 Mineralogía.....	56
5.1.4 Mediciones de pH en pasta.....	58
5.2 Estacionamiento del km 45+000.....	61
5.2.1 Morfología.....	63
5.2.2 Geología.....	67
5.2.3 Mineralogía.....	69
5.2.4 Mediciones de pH en pasta.....	70
5.3 Estacionamiento del km 47+000.....	74
5.3.1 Morfología.....	75
5.3.2 Geología.....	77
5.3.3 Mineralogía.....	79
5.3.4 Mediciones de pH en pasta.....	80
5.4 Afectaciones de las obras de civiles.....	83
6. Conclusiones y recomendaciones.....	88
REFERENCIAS.....	94
ANEXOS.....	100
Anexo 1: Equipo, materiales y reactivos.....	100
Anexo 2. Protocolos.....	101
Anexo 3. Petrografía.....	104
Anexo 4. Cartas de solicitud y aceptación de Práctica Dirigida.....	107
Anexo 5. Tablas de tratamiento de pH por talud y total.....	109

Índice de Figuras

Figura 1. Ejemplo de un sitio con alteración hidrotermal en el km 46+000 RN-27 fotografiado en mayo 2014. Se observan rocas meteorizadas arcillosas con ocasionales venillas de calcita y pátinas de óxidos de hierro. En este sitio se hicieron pruebas para determinar DAR y los resultados fueron negativos (UGERVN 2015).....	4
Figura 2. Ejemplo de un sitio con drenaje ácido de roca en km 48+000 RN-27 mayo 2014. Se observa que las fracturas en las rocas están rellenas por azufre botroidal, azufre en nódulos y pirita. En este sitio se hicieron ensayos para determinar DAR y los resultados fueron positivos (UGERVN 2015).	5
Figura 3. Ubicación de la zona de estudio del drenaje ácido de residuos-DAR en la Ruta Nacional N°27. Curvas de nivel de las hojas topográficas 1:25 000 Río. Proyecto Terra del I.G.N. Coordenadas CRTM05.....	13
Figura 4. Diagrama de Pourbaix Eh-pH para los elementos Fe, S, O, H. Este diagrama muestra la estabilidad química de los sulfuros, sulfatos e hidróxidos de hierro en el ambiente natural. Las líneas verticales representan equilibrios ácido-base, mientras que las líneas horizontales indican equilibrios oxidación/reducción. Las líneas oblicuas son equilibrios combinados. La jarosita y la schwertmanita son sulfatos formados en ambientes oxidantes y que al disolverse generan aguas ácidas. Las especies disueltas son los iones hexaacquohierro (II), hexaacquohierro (III), sulfato acuoso, hidronio e hidróxido. (Tomado de Dold, 2009, curso de Geoquímica Ambiental, UNIA, Huelva España modificado de Bigham et al. 1996)	15
Figura 5. Diagrama de flujo con la metodología del trabajo realizada en esta práctica dirigida.	18
Figura 6. Ubicación de los puntos de muestreo en el talud del km 38+600. Los puntos en verde corresponden a los sitios elegidos para la recolección de muestras para análisis de pH en pasta. La flecha de color naranja corresponde a la línea férrea. Las flechas en amarillo sobre la carretera, indican la dirección hacia la izquierda a Orotina, hacia la derecha a San José. Se trabajó tanto el lado derecho como el lado izquierdo, donde fue posible.	20
Figura 7. Ubicación de los puntos de muestreo en el talud del km 45+000. Los puntos en verde corresponden con los sitios elegidos para la recolección de muestras para análisis de pH en pasta. La carretera en dirección hacia la izquierda se dirige a Orotina, hacia la derecha a San José. Se trabajó tanto el lado derecho como el lado izquierdo, donde fue posible.	21
Figura 8. Ubicación de los sitios de muestreo en el talud 47+000. Los puntos en verde corresponden con los sitios elegidos para la recolección de muestras para análisis de pH en pasta. La carretera en dirección hacia la izquierda se dirige a Orotina, hacia la	

derecha a San José. Se trabajó únicamente el lado izquierdo LI, debido a que el lado derecho LD no era posible acceder por las pendientes verticales y la cobertura en concreto sobre el talud.	22
Figura 9. Recolección, rotulación y organización de muestras en los diferentes estacionamientos seleccionados. Las muestras fueron descritas, fotografiadas y rotuladas con marcador indeleble en las bolsas tanto en el exterior, como en el interior con tiquetes para evitar confusiones. A Recolección de muestra en estacionamiento del km 47+000, foto con pala como escala. B Foto en afloramiento del km 38+600. C Orden y confirmación de correcta rotulación de las muestras.....	24
Figura 10. A. Levantamiento topográfico con Lidar Terrestre del talud sur del kilómetro 45+000. Julio 2015 B. Levantamiento topográfico por medio de VANT en el kilómetro 38+600. Agosto 2015. Ambos instrumentos señalados en círculos rojos.....	25
Figura 11. Proceso en laboratorio de Petrografía de la Escuela Centroamericana de Geología UCR. A. Horno de secado de muestras. B. Tamizado de muestras C. Triturador trifásico D. Pulverizador trifásico	27
Figura 12. Procesado de muestras en el Laboratorio de Geoquímica de la Escuela Centroamericana de Geología UCR. A. Pesado de muestras en balanza analítica. B. Agitación de muestras con agua, pastilla metálica y agitador eléctrico C. Medición electroquímica con pH-metro.	28
Figura 13. Mapa Geomorfológico Regional. Modificado de Porras et al. (2012) y Lanamme(2014).....	30
Figura 14. Ejemplo de “Corte en cajón”, corte sub-vertical en los taludes a ambos lados del camino. Se observa la morfología típica de la zona de estudio y el corte > 55° de inclinación realizado para crear la carretera. El flujo del agua en este tipo de corte es hacia los lados del talud y hacia el frente donde se realizó el corte. Imagen aérea cortesía de fotosaereascr.com®. Estas fotografías son de los años 2008-2009, previas a la apertura de la carretera. Flechas amarillas sobre la carretera, hacia la izquierda el sentido Orotina y, hacia la derecha, el sentido San José.....	32
Figura 15. Fotografías aéreas cortesía de fotosaereascr.com® en el estacionamiento del km 38+600, mostrando el talud norte recubierto por concreto lanzado en la etapa de construcción de la carretera, previo a la demarcación, mostrando una afectación prematura del talud con zonas con hundimientos y deformaciones en el concreto. A. Vista hacia el norte. Las zonas de color naranja sobre el concreto lanzado son producto de la oxidación y el desgaste por escorrentía de flujos posiblemente ácidos desde la etapa inicial del proyecto. La línea en amarillo punteada demarca la línea férrea, B. Vista hacia el noroeste. Desde esta perspectiva se observa que es un talud de corte en cajón. En las flechas rojas sólidas se indica la dirección del flujo de agua. En líneas punteadas rojas se observan indicios del desprendimiento del concreto. En flechas amarillas las direcciones hacia Orotina al noroeste y San José al este.	33
Figura 16. Corte en cajón en el km 45+000, muestran la zona de trabajo previo a ser abierta la carretera. Se observa que para ese momento ya hay desprendimientos de rocas y suelos, producto de los cortes subverticales que se realizaron y que desestabilizaron el terreno. El puente en la imagen es el de la Quebrada Concepción. Imágenes aéreas	

cortesía de fotosaereascr.com®	34
Figura 17. Imagen aérea cortesía de fotosaereascr.com® en el km 47+000, muestra la zona de trabajo en la etapa de construcción de la carretera. Se observa un deslizamiento en la parte central de la foto. En líneas punteadas rojas, zona con desprendimiento de material, en líneas punteadas amarillas oscuras acumulación del material recolectado el cual fluye talud abajo, como lo indica la flecha. Con las flechas amarillas se indica la dirección hacia Orotina al oeste y hacia San José al este.	35
Figura 18. Mapa Geológico Regional. Modificado de Denyer et al. (2003 ^a), Porras et al. (2012) y LanammeUCR (2015).	37
Figura 19. A. Colada andesítica de la Formación Grifo Alto en estacionamiento del km 45+000. Las rocas presentan silicificación producto de la alteración hidrotermal y DAR. B. Acercamiento de imagen de la izquierda, con lápiz como escala.	39
Figura 20. A. Afloramiento con amplia arcillitización, alteración hidrotermal-degradación y DAR en lavas andesitas de la Formación Grifo Alto en el estacionamiento del km 47+000. B. Vista frontal del talud lado izquierdo.....	40
Figura 21. A. Brechas monomícticas de la Formación Grifo Alto en el estacionamiento del km 38+600. Piqueta como utilizada como escala. B. Acercamiento en zona con alteración y lixiviados de pirita y azufre en colores naranjas y grisáceos. Rocas silicificadas demarcadas entre las líneas en puntos rojos.	41
Figura 22. A. Efecto de arcillitización, rocas convertidas en suelo por alteración hidrotermal y meteorización. Ejemplo en estacionamiento del km 47+000. En los sectores con mayor acidez no hay crecimiento de vegetación. B. Brecha y ductos o pipes por donde suben los fluidos hidrotermales que degradan las rocas en estacionamiento del km 38+600. Las rocas fueron alteradas a arcilla y se convierten en suelos. La flecha en rojo indica el sentido de movimiento ascendente de los fluidos. Piqueta como escala.	42
Figura 23. Marco tectónico regional. Las líneas indican el movimiento relativo de las placas. Simbología: CDCCR: Cinturón deformado del centro de Costa Rica, FSR: frontera suave rugosa, LF: levantamiento de Fisher, PQ: <i>plateau</i> de Quepos, ZFP: falla transformada de Panamá, CDSP: cinturón deformado del sur de Panamá. Modificado de Montero (2001)	43
Figura 24. Mapa de pendientes en el estacionamiento del kilómetro 38+600. Se muestran las zonas elegidas para obtener muestras para la determinación de pH en pasta.	49
Figura 25. Tomada y modificada de Ruiz, P., Naranjo., R., Valverde, C., Garro. & Barrantes., 2015: Informe de evaluación y fiscalización, ruta nacional No. 27 taludes km 38+600, LM-PI-UGERVN-008-2015 – 116 pp. Universidad de Costa Rica Programa Infraestructura del Transporte (PITRA) LanammeUCR, San José: Modelo tridimensional del lado derecho del estacionamiento en el km 38+600, generado a partir de datos Lidar obtenidos mediante VANT. A. Altura máxima, sitios de muestreo y sección de concreto colapsado (LD). B. Distancia entre los puntos más altos de los taludes de corte. C. Vista oblicua superior del talud norte. D. Pendientes en grados, lado derecho.	51

Figura 26. Modelo tridimensional del lado izquierdo del estacionamiento en el km 38+600, generado a partir de datos Lidar obtenidos mediante VANT. Modificado de Ruiz et al. (2015) A. Altura máxima, sitios de muestreo y malla para control de erosión. B. Vista lateral, viendo al este. C. Vistas lateral viendo al oeste. D. Pendientes en grados del talud, lado izquierdo.....	52
Figura 27. Ejemplos de brechas monomíticas de la formación Grifo Alto, en el lado izquierdo del estacionamiento del km 38+600. A. Se muestra el tamaño de los clastos. B. Se observa a la izquierda de la imagen, los restos de la malla de control de erosión en mal estado.	54
Figura 28. Lado derecho, km 38+600 A. Parte inferior. Sectores con silicificación, arcillitización, alteración hidrotermal, pátinas de óxidos de Hierro y Manganese. En la parte superior a la derecha de la fotografía, se observan restos del concreto lanzado en mal estado. B. Parte superior hacia el Noreste. Se observa amplia meteorización y alteración hidrotermal en hilillos o enrejado tipo “ <i>stockwork</i> o <i>pipes</i> ”, que coincide con las fracturas por donde ascendieron los fluidos. Esta zona presenta silicificación en los bloques y en las fracturas.....	55
Figura 29. Muestras de minerales de yeso y sulfuros presentes en el talud norte. A. Cristales de sulfatos y yeso en las rocas y en la malla metálica de contención. B. Obsérvese la acumulación de sulfuros y azufre, piqueta como escala. C. Acercamiento en azufre exudado en la roca.....	57
Figura 30. Valores de pH en el lado derecho (derecha) y lado izquierdo (izquierda) del estacionamiento en el kilómetro 38+600. Se observa una concordancia en los datos, mostrando una predominancia en las zonas de afectación sectorizadas en la parte inferior del talud. Conforme se sube en altura sobre el talud, aumenta el valor de pH. .	59
Figura 31. A Interpolación por triangulación lineal del lado derecho (LD), km 38+600. Las zonas con pH más bajo coinciden con las partes inferiores del talud por debajo de los 15 m de altura sobre el nivel de la carretera, zonas con amplia arcillitización y silicificación. Las pendientes del talud y el concreto lanzado o lo que queda de él, induce a la sectorización de la recolección de muestras para la determinación de pH. B. Acercamiento de la Interpolación Lineal del muestreo del LD.	60
Figura 32. Valores de pH en pasta para el total de muestras analizadas en el estacionamiento del km 38+600. Lo valores con pH superiores a 4,0 corresponden a los bordes y a las partes superiores de los taludes LD y LI.....	61
Figura 33. A. Mapa de pendientes en el estacionamiento del kilómetro 45+000. Se muestran las zonas elegidas para obtener muestras para la determinación de pH en pasta y los resultados de las muestras por talud. B. Determinaciones de pH, LD. C. Determinaciones de pH, LI.	62
Figura 34. Modelo tridimensional del lado derecho del estacionamiento en el km 45+600, generado a partir de datos Lidar de vuelo tripulado LanammeUCR. A. Altura máxima, sitios de muestreo en rojo. B. Vista oblicua superior del talud LI, vista hacia al oeste. C. Vista oblicua superior del talud LD, viendo hacia el este. D. Pendientes en grados LD, con puntos de muestreo en negro.....	64
Figura 35. Modelo tridimensional del lado izquierdo del estacionamiento en el km	

45+000, generado a partir de datos Lidar obtenidos mediante vehículo tripulado LanammeUCR. A. Altura máxima, sitios de muestreo en negro. B Vista oblicua superior, distancia entre taludes, vista al este. C Vista oblicua superior viendo al oeste. D Pendientes en grados LI.	66
Figura 36. Ejemplo de lavas andesíticas de la formación Grifo Alto en el estacionamiento del km 45+000. Se observa la morfología de corte en cajón. Hay barreras de protección a la altura de la carretera como una medida de contención por la posible caída de rocas. A. Lado derecho, zona de muestreo descubierto de concreto, se observan tres bermas. B. Lado izquierdo, con dos terrazas en la parte superior.	67
Figura 37. Parte superior del talud, LI. Se observa arcillitización de la tonalidad beige-café-naranja-morada, óxidos de hierro y arcillas. Zona de amplia alteración.	68
Figura 38. Ejemplos de lavas andesíticas de la formación Grifo Alto, en el talud LD en el estacionamiento del km 45+000. Se observa la aparición de “yellow boy”, por precipitación de sulfatos, indicando un estado avanzado de DAR.	69
Figura 39. Modelos tridimensionales con interpolación por triangulación lineal del estacionamiento en el km 45+000, generado a partir de datos Lidar obtenidos mediante vehículo tripulado LanammeUCR. A. Talud LD, los sitios de muestreo se representan como puntos negros. B Vista oblicua superior, vista al este. C Vista oblicua superior vista al oeste. D Talud LI. Los sitios de muestreo se representan como puntos negros. 71	
Figura 40. Valores de pH en pasta para el total de muestras analizadas en el estacionamiento del km 45+000.	72
Figura 41. Muestra #154 talud sur km 45+000. En el recipiente se encuentra la bacteria <i>Thiobacillus ferroxidans</i> , obtenida del fluido supernatante de la muestra analizada en el Laboratorio de Geoquímica de la Escuela Centroamericana de Geología. Se obtuvieron resultados de pH= 1,84, salinidad superior al 80 % 1058 20/20.	73
Figura 42. Mapa de pendientes en el estacionamiento del kilómetro 47+000. Se muestran las zonas elegidas para obtener muestras para la determinación de pH en pasta y sus resultados.	74
Figura 43. Modelo tridimensional del LI del estacionamiento en el km 47+000, generado a partir de datos Lidar obtenidos mediante vehículo tripulado LanammeUCR. A. Altura máxima, sitios de muestreo en rojo. B Vista oblicua superior viendo al oeste C. Vista oblicua superior viendo al este, distancia entre puntos más altos de taludes. D. Pendientes en grados del talud LI.	76
Figura 44. Sectores con silicificación, arcillitización, alteración hidrotermal, sulfatos y pátinas de óxidos de Hierro-Manganeso y DAR.	78
Figura 45. Ejemplos de sulfatos y sulfuros presentes en el talud sur. A. Rocas alteradas con presencia de cristales de Pirita, Sulfatos y Yeso. Pala como escala del afloramiento. Provocan el colapso de la cuneta la cual está oxidada y con pérdida del componente calcáreo. B. Acercamiento. Obsérvese la acumulación de estos minerales en las fracturas.	79
Figura 46. Modelos tridimensionales con interpolación por triangulación lineal del estacionamiento en el km 47+000, generado a partir de datos Lidar obtenidos mediante vehículo tripulado LanammeUCR. Lado izquierdo A. LI, los sitios de muestreo se	

representas como puntos negros. B Vista oblicua superior, viendo al este. C Vista oblicua superior viendo al oeste.....	81
Figura 47. Valores de pH en pasta para el total de muestras analizadas en el estacionamiento del km 47+000.	82
Figura 48. Datos de pH en pasta de los taludes: 38+600, 45+000 y 47+000; recopilado en este trabajo.	83
Figura 49. Figura de afectación de taludes. Tomado y modificado de Ruiz (2015) A. Las rocas alteradas hidrotermalmente del talud original con presencia de sulfuros y sulfatos fueron expuestas a condiciones de oxidación e interacción con humedad y agua de lluvia cuando se hicieron los cortes para construir la carretera. Los materiales, fueron cubiertos por concreto lanzado y se colocaron drenajes plásticos para propiciar la salida de agua infiltrada. B. Al infiltrarse el agua de lluvia con un pH promedio de 6,5 e interactuar con los sulfuros de las rocas, se generó un aumento en su acidez, posteriormente se generaron sulfatos que lentamente saturaron y provocaron la colmatación de los drenajes, disminuyendo la evacuación del agua ácida infiltrada. C. En el concreto degradado, se produjeron grietas que permitieron el ingreso y la salida del agua, así como la pérdida del suelo localizado debajo del concreto. Las nuevas grietas aceleraron el proceso de corrosión en el acero, lo que derivó en pérdida de resistencia y mayor deterioro. D. Una vez alcanzada la condición severa de deterioro, generada por el proceso de DAR, el empuje hidrostático ácido provocó la caída del concreto agrietado, junto con suelo y rocas del talud.	84
Figura 50. Ejemplos de afectación en concreto en (líneas punteadas rojas): A, km 47+000 LD, cuneta en voladizo colapsada, por deslizamiento de material en la parte inferior. Talud a 20m de altura sobre el nivel de la carretera. B. km 47+000, LI cunetas desgastadas, oxidadas y quebradas por efecto directo de DAR, al lado de la carretera. C y D. km 45+000, concreto lanzado resquebrajado e inexistente en el 80% del talud LD.	86
Figura 51. Ejemplo de afectación en km 38+600. A. Vista Panorámica de la carretera. En dirección hacia la derecha San José, en dirección hacia la izquierda Orotina. B. Concreto ausente en el talud sub-vertical del LD. C. Acercamiento de las zonas afectadas, LD. Fracturas métricas en concreto lanzado. Se observan tuberías plásticas que actúan parcialmente como drenajes, dentro del talud. En el sitio ocurren deslizamientos frecuentemente, generando peligro para los vehículos que transitan la vía. Los componentes de acero están corroídos y presentan disminución en diámetro y resistencia.....	87

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Casos reportados a nivel mundial de afectación por DAR en estructuras de carreteras.....	9
Cuadro 2. Fallas medidas en los estacionamientos estudiados. Se observó correlación principalmente con las zonas de falla Escobal y Balsa descritas por Porras et al (2012), las cuales coinciden con las direcciones medidas en campo en este estudio. Las fallas medidas y descritas por Porras et al. (2012) ver figura 18, se encuentran en las cercanías de los afloramientos analizados en este estudio y los están afectando directamente.	46
Cuadro 3. Resultados de la determinación del pH en pasta en muestras de suelos y rocas tomadas en los taludes del estacionamiento en el km 38+600 de la Ruta Nacional N° 27.....	61
Cuadro 4. Resultados de muestras analizadas en los taludes del estacionamiento en el km 45+000 de la ruta nacional No. 27.....	73
Cuadro 5. Resultados de muestras analizadas en los taludes del estacionamiento en el km 47+000 de la ruta nacional No. 27.....	82
Cuadro 6. Resumen de resultados de muestras analizadas con metodología de pH en pasta, para cada afloramiento estudiado en este trabajo. Valores de pH en totalidad de muestras de los tres afloramientos estudiados. El promedio de pH de los tres sitios es de 4,06.	83

Resumen

El laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (Lanamme) en conjunto con la Escuela Centroamericana de Geología (ECG) ambos de la Universidad de Costa Rica, han identificado que en varios sitios de la Ruta Nacional No. 27 (RN-27) se está dando el proceso de drenaje ácido de roca (DAR) y que este tiene un impacto en los materiales originales del sitio y los utilizados para la estabilización de los taludes. Este proyecto se enfocó en la identificación cuantitativa y descriptiva de los principales taludes de esta ruta donde se está dando este proceso, específicamente en los estacionamientos de los kilómetros 38+600, 45+000 y 47+000. Estos sitios presentan evidencias visuales del impacto del DAR, tanto en las rocas y suelos, como el concreto lanzado, acero y mallas metálicas utilizadas para la estabilidad de los taludes expuestos en los cortes de carretera.

El drenaje ácido es un proceso químico que se da por la acidificación de aguas como consecuencia de la oxidación de minerales ricos en azufre. Estas aguas al escurrir entre los materiales los degrada aceleradamente debido a cambios mineralógicos que se asocian a cambios físicos.

Aunque en el país se han realizado otros proyectos de investigación para determinar sitios donde se esté dando DAR, esos trabajos han estado relacionados con actividad minera y generación de energía hidroeléctrica en sitios volcánicos. Sin embargo, este estudio continúa con el enfoque del LanammeUCR y la ECG de estudiarlo en la RN-27.

La importancia de este trabajo está en el aporte de demostrar con datos y descripciones detalladas desde lo macro a lo micro de los taludes, que efectivamente en los taludes estudiados se está presentando el proceso de DAR y que está impactando las obras ahí construidas. Y que, por lo tanto, esto las convierte en un peligro para los usuarios.

Para esto se utilizó una metodología de pH en pasta, descripción, geomorfológica, geológica y mineralógica en microscopio. En total la zona de estudio de estos taludes abarca un área aproximada de 9,4 km² lineales sobre la carretera y sus alrededores.

A partir de la recopilación de la geología de la zona y la comprobación de campo, se determinó la presencia de depósitos volcánicos andesíticos que se asocian con la Formación Grifo Alto, estos están atravesados por zonas de falla, las cuales se podrían asociar con procesos de alteración hidrotermal con depositación de sulfuros, generación de silicificación ligado a las fracturas y arcillitización generalizada. Estos depósitos, al estar expuestos a las condiciones del ambiente en una zona tropical húmeda e interactuar el agua y oxígeno con los sulfuros y sulfatos producto de la alteración hidrotermal, generaron el proceso de DAR. Producto de esto, las rocas en microscopía presentan

minerales de plagioclasa y piroxeno con corrosión debido a la abundancia de sulfuros y la oxidación del hierro. Se observó también calcita y cuarzo secundario.

Mediante el uso de información Lidar, fotografías aéreas y de un software especializado, se realizó un levantamiento topográfico de la zona y se generaron modelos de elevación digital para el análisis geomorfológico de los sitios elegidos para realizar mediciones de pH en pasta de rocas y suelos. Los cortes realizados por el trazado de la RN-27 han generado pendientes muy fuertes a los lados de la carretera, comúnmente con ángulos $> 55^\circ$, algunos $> 70^\circ$. Estos cortes subverticales, presentan un flujo de las aguas hacia los lados del talud y hacia el frente donde se realizó el corte. Se comprobó la acidez de los estacionamientos de los tres sitios muestreados con la metodología de pH en pasta, produciendo los siguientes resultados generales: pH mínimo = 1,8, pH máximo = 8,3 y pH promedio = 3,5.

Se demostró que en los estacionamientos de los kilómetros estudiados de la RN-27 en este proyecto se está dando el proceso de DAR y que está impactando las obras de estabilidad de los taludes.

Palabras Claves: Ruta Nacional N°27, alteración hidrotermal, sulfuros, sulfatos, ácido sulfúrico, drenaje ácido de roca, deterioro en concreto, corrosión de acero.

Abreviaturas

ACG: Asociación Costarricense de Geotecnia

DAM: Drenaje Ácido de Minas

DAR: Drenaje Ácido de Rocas

ECG: Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica

FeO: Óxido de Hierro

GPS: Sistema de Posición Global, acrónimo del inglés GPS (Global Positioning System)

HCl: Ácido clorhídrico

IGN: Instituto Geográfico Nacional

LanammeUCR: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica

Lidar: acrónimo del inglés LIDAR, Light/Laser Detection and Ranging

MED: Modelo de Elevación Digital

MnO: Óxido de manganeso

pH: logaritmo negativo de la concentración molar de iones hidronio $[H_3O]^+$,

PITRA: Programa Infraestructura del Transporte

Po: Pirrotina

Py: Pirita

RN-27: Ruta Nacional N° 27

SNIT: Sistema Nacional de Información Territorial

UCR: Universidad de Costa Rica

UGERVN: Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional del LanammeUCR

VANT: Vehículos Aéreos No Tripulados

Puntos cardinales

E: este

N: norte

NE: noreste

NW: noroeste

S: sur

SE: sureste

SW: suroeste

W: oes

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo de práctica dirigida, se presenta para optar por el grado académico de Licenciatura en Geología de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica, con un interés académico enmarcado bajo la dirección del Laboratorio Nacional de Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica LanammeUCR. La ley No. 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. Este trabajo es parte del proyecto de investigación inscrito en vicerrectoría de la UCR llamado: Estudio de presencia de drenaje ácido de rocas (DAR) en taludes de la Ruta Nacional N°27 (RN-27), con el código 321-B6-208.

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 geólogos pueden participar directamente. Un mejor entendimiento de estos procesos, puede llevar a planteamiento de medidas correctivas adecuadas para resolver o minimizar los efectos negativos que generan procesos químicos en la inestabilidad de taludes de carreteras. El primer paso, entonces, es identificar los sitios específicos donde se dan estos procesos. Este trabajo, busca reconocer esos sitios y señalar cuales son los que están afectados por el drenaje ácido de rocas en la Ruta Nacional N° 27.

La Ruta Nacional N° 27 fue construida con el propósito de comunicar el Valle Central con la costa pacífica y mejorar el desenvolvimiento económico del país. Desde su construcción 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, incluyen la colocación de mallas electrosoldadas, que se cubrieron con 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).

En el curso de geoquímica aplicada del año 2014 a cargo del Dr. Paulo Ruiz Cubillo y del M.Sc. Alejandro Arauz, se evaluó la hipótesis de que si en algunos de los taludes inestables de la RN-27 se estaba dando un proceso de drenaje ácido de la roca, muy similar al drenaje ácido de mina, pero que, en este caso, estaría ocurriendo en los taludes expuestos por la construcción de carretera. Los resultados del trabajo del curso fueron utilizados en el informe del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR) (UGERVN 2015) en el que se demostró que la afectación química en ciertos taludes de la RN-27 va más allá de la simple alteración hidrotermal y, en efecto, está más relacionada con la generación de un “drenaje ácido de roca” (DAR). También se demostró que no todos los taludes que presentan alteración hidrotermal presentan el DAR.

En este trabajo, bajo la dirección de LanammeUCR, se le dio continuidad a la caracterización geológica de los taludes de la RN-27 y determinar en cuáles de ellos ocurre el DAR.

En los anexos se presenta la carta de intenciones de LanammeUCR para realizar este trabajo bajo la modalidad de práctica dirigida.

1.1. Definiciones

Se procede a dar las definiciones y descripciones de alteración hidrotermal y drenaje ácido de roca, debido a que ambos procesos son distintos. No siempre la presencia de uno implica necesariamente la ocurrencia del otro.

1.1.1 Alteración hidrotermal: La alteración hidrotermal o hidrotermalismo, ocurre como producto de la circulación de fluidos termales entre las rocas. En algunos casos esto conlleva a la formación de minerales sulfurosos, el más común de ellos es la pirita (FeS_2), aunque podrían generarse otros tales como la calcopirita, la pirrotina, la arsenopirita, la marcasita y la esfalerita; o incluso la formación de productos secundarios metaestables arcillosos o minerales del grupo de los sulfatos como la ferrihidrita, la schwertmanita, la jarosita, la hematita y la goethita, que podrían comprometer la estabilidad física y química de los taludes (Slack 1993; Dold 2009; & Shanks 2012).

En una zona afectada por el hidrotermalismo, también es frecuente observar la presencia de sílice en formas tales como vetas de cuarzo, calcedonia y silicificaciones en la matriz de la roca, con acumulación de sulfuros que cortan las rocas originales. La presencia de depósitos de óxidos de hierro y de manganeso en forma de pátinas sobre la superficie de las rocas es originada por la oxidación de los sulfuros; si las rocas presentes contienen plagioclasas, éstas por procesos de meteorización química, pueden transformarse en calcita (Slack 1993; Dold 2009). Un sitio con alteración hidrotermal donde exista una mayor cantidad de sulfuros o sulfatos que de carbonatos y que además esté expuesto al oxígeno y a la humedad o en contacto directo con el agua, tiene un potencial muy alto de generar un drenaje ácido de las rocas. En contraste, una mayor presencia de carbonatos, o los ambientes áridos y anóxicos, disminuyen el potencial de generación de un drenaje ácido de las rocas en un sitio particular.



Figura 1. Ejemplo de un sitio con alteración hidrotermal en el km 46+000 RN-27 fotografiado en mayo 2014. Se observan rocas meteorizadas arcillosas con ocasionales venillas de calcita y pátinas de óxidos de hierro. En este sitio se hicieron pruebas para determinar DAR y los resultados fueron negativos (UGERVN 2015).

1.1.2 Drenaje Ácido de Rocas (DAR): El término “drenaje ácido de rocas” hace referencia a la acidificación de las aguas naturales como consecuencia de la oxidación de rocas que contienen importantes concentraciones en minerales metálicos ricos en azufre o sulfuros (ejemplos: pirita, arsenopirita, marcasita, calcopirita, esfalerita, pirrotina, entre otros). Estos tienden a oxidarse al estar expuestos a los agentes naturales, como el agua y el aire, por destape de la cobertura vegetal o, simplemente, por exposición a la atmósfera oxidante.

Durante el proceso de oxidación del mineral, los átomos de azufre reducido (sulfuro) se oxidan a sulfato y forman ácido sulfúrico. Esto se ve incrementado si hay poca presencia relativa de neutralizadores como rocas calizas o minerales calcáreos como calcita u otros carbonatos, los que podrían disminuir la acidez. Al mismo tiempo, se pueden liberar otros

elementos presentes en la roca como Cu, Zn, Ag, Cr, Mn, As, entre otros; los cuales pueden incorporarse al agua (USEPA, 1994; Grandia et al., 2009; Rodríguez, 2010; & Dold, 2010). El resultado final es la formación de un efluente ácido que afecta las rocas, la flora, la fauna y las estructuras civiles (USEPA, 1968, 1994 & Ruiz, 2004).



Figura 2. Ejemplo de un sitio con drenaje ácido de roca en km 48+000 RN-27 mayo 2014. Se observa que las fracturas en las rocas están rellenas por azufre botroidal, azufre en nódulos y pirita. En este sitio se hicieron ensayos para determinar DAR y los resultados fueron positivos (UGERVN 2015).

1.2. Justificación

La RN-27 desde su construcción ha presentado problemas de estabilidad en varios sectores, los cuales inicialmente fueron asociados con sitios donde se identificaron rocas afectadas por alteración hidrotermal, fallas tectónicas y desprendimientos de roca por alta fracturación. (ACG 2010; Porras et al., 2012; & UGERVN 2014). Esta es una ruta que

funciona bajo la modalidad de concesión de obra pública y está a cargo de la empresa Global Vía.

Una de las funciones de la ley 8114 del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica LanammeUCR, es la evaluación y fiscalización de las rutas nacionales en concesión, por lo tanto, la RN-27 está dentro de sus responsabilidades. A partir de los datos generados en el curso de geoquímica aplicada del 2014 y del informe realizado por LanammeUCR (UGVRVN 2015), se comprobó, mediante pruebas de pH en pasta, la ocurrencia de DAR en los taludes del estacionamiento del kilómetro 48+000 y se sugirió fuertemente su ocurrencia en el km 38+700. También se descartó su ocurrencia en los taludes del km 46+000, un sitio que por sus características era candidato a que ocurriera el DAR. Por lo tanto, quedó demostrado que para determinar si ocurre DAR en un sitio, no basta con las evidencias visuales.

En la RN-27 existen otros taludes que también podrían ser zonas afectadas por DAR. En algunos de ellos se observan rocas muy alteradas y la presencia de sulfuros. Otros taludes con las mismas características han sido estabilizados con anclajes de acero y concreto lanzado y que, actualmente, presentan fracturas y degradación severa, así como pátinas de óxidos de hierro, sugiriendo que pueden ser zonas afectadas por el DAR.

La utilización de materiales como el concreto y el acero en sitios con DAR podría propiciar su colapso y generar un peligro adicional para los usuarios de la ruta. Solamente con la identificación precisa del DAR en estos taludes, el LanammeUCR podrá realizar las recomendaciones pertinentes al Consejo Nacional de Concesiones y a la concesionaria para mejorar las condiciones de seguridad de la ruta.

1.3. Alcances

Pese a que las evidencias visuales y de afectación en los taludes de la RN-27 son

claras, hay que demostrar cuantitativamente que estos sitios sufren de DAR y determinar así su grado de afectación. Al demostrar que en un sitio ocurre el DAR, el LanammeUCR podría utilizar esa información para hacer recomendaciones para tratar un problema directamente identificado y sugerir a la concesionaria la remoción del concreto y el uso de materiales que no se vean afectados por el DAR.

Es fundamental acotar que solamente con mediciones de pH en pasta en el laboratorio se puede determinar cuantitativamente si ocurre DAR o no, pues el indicio visual no es determinante. La metodología de pH en pasta será descrita en detalle más adelante, y se aplicó en taludes donde ya se identificó alteración hidrotermal o la afectación a los materiales.

No se espera plantear una solución al DAR ya que se escapa de los alcances de este trabajo y de las funciones por ley de evaluación y fiscalización de LanammeUCR. Esa responsabilidad le corresponde a la concesionaria de la ruta. Tampoco se realizarán análisis para la determinación de la concentración de elementos tóxicos en el agua del DAR, si bien estos pueden haber sido movilizados por el DAR, su determinación debe hacerse en un estudio futuro.

1.4. Importancia de este trabajo

El DAR puede ocurrir al exponer sitios tanto por medios naturales como por causas antrópicas. Es una problemática común en las actividades mineras, en las que se acostumbra trabajar en grandes zonas con alteración hidrotermal que son destapadas o expuestas para extraer minerales. Sin embargo, este proceso no está limitado únicamente a las minas y también puede darse al construir carreteras o hacer destapes (Dold, 2010).

Cabe destacar que hay pocos estudios de carreteras afectadas por DAR. La

mineralogía que origina el DAR y la afectación que puede generar en las estructuras y los taludes es variada. A continuación, se presentan algunos casos expuestos a nivel mundial en publicaciones (Cuadro 1). En Costa Rica, solamente el LanammeUCR ha estudiado este tema en carreteras y se espera que este trabajo sea un aporte más para las investigaciones que se realizan actualmente en ese laboratorio.

Un caso documentado de DAR en construcción de carreteras ocurrió en el estado de Virginia, Estados Unidos, donde se reportó 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; asociados a la degradación de los materiales de construcción, meteorización de los materiales de relleno (ya que contenían sulfuros), precipitación de sulfatos afectando la estabilidad estructural, y la disminución de la cobertura boscosa junto a la carretera, que incrementaron la erosión y 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.

Cuadro 1. Casos reportados a nivel mundial de afectación por DAR en estructuras de carreteras.

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

Py = Pirita, Po = Pirrotina

En este trabajo se dio continuidad a la investigación de LanammeUCR (UGVRVN 2015) sobre la caracterización geológica de taludes y el proceso de DAR que ocurre en sitios la RN-27 y se pretende generar observaciones actualizadas de las diferencias en el grado de afectación de DAR según los materiales encontrados en cada afloramiento. Se considera que los resultados de este estudio sean complementarios a otros trabajos que realiza el LanammeUCR y que pueden servir para guiar a la

concesionaria a tomar medidas para reducir el peligro al que están expuestos los usuarios de esta ruta por los taludes afectados por el DAR.

Otra contribución que se generó en este estudio, es la creación y aplicación de un protocolo para la medición del pH en pasta de un material en agua, es decir, de una extracción acuosa de las especies lixiviables. En el estudio anterior, los resultados se obtuvieron del laboratorio de química del LanammeUCR. Con la creación de este protocolo, otros estudiantes de geología y del curso de geoquímica aplicada podrán recrear los análisis y realizar las pruebas en materiales de otros sitios del país donde existan indicios de que se estuviera presentando este proceso. Así mismo, el Laboratorio de Geoquímica de la ECG podría llegar a implementar este protocolo y colocarlo en la lista de venta de servicios que brinda. Este protocolo se presenta en los anexos.

1.5. Problema

En la RN-27 existen taludes que se sospecha que están siendo afectados por drenaje ácido de rocas (DAR) debido a su apariencia como resultado de sus condiciones geológicas, mineralógicas particulares y por la ocurrencia de daños en algunas obras civiles de concreto y acero que hay sobre ellos. Se pretende demostrar cuantitativamente, mediante la metodología de pH en pasta, en cuáles de los sitios elegidos para este estudio ocurre el DAR.

1.6. Hipótesis de trabajo de la práctica dirigida

¿Están siendo afectados por el drenaje ácido de rocas (DAR) los taludes que presentan indicios cualitativos a la altura de los kilómetros 38+600, 45+000 y 47+000 en la RN-27? Para lo cual se va a aplicar la metodología de pH en pasta y demostrar o no la ocurrencia de este proceso en esos sitios.

1.7. Objetivos

1.7.1 Objetivo General

Estudiar detalladamente las unidades litológicas ubicadas en tres sitios de la RN-27, específicamente a la altura de los kilómetros 38+600, 45+000 y 47+000 y que presentan indicios cualitativos de drenaje ácido de roca (DAR) para confirmar o descartar cuantitativamente su ocurrencia mediante la determinación del pH en pasta.

1.7.2 Objetivos específicos

- Estudiar y describir la morfología del área de estudio y de cada sitio específico que se va a caracterizar para buscar relaciones morfogenéticas que puedan estar asociadas con el DAR
- Describir las diferentes litologías presentes en los sitios de investigación para caracterizar geológicamente los taludes seleccionados.
- Estudiar y describir la geología y tectónica del área de estudio para que junto con las descripciones de cada sitio específico se busquen relaciones tectónicas en la génesis o incidencia de DAR.
- Analizar muestras de roca y de suelo mediante la metodología de pH en pasta para determinar cuantitativamente si hay ocurrencia de DAR.
- Describir cualitativamente el impacto en la carretera, taludes recubiertos con concreto lanzado y cunetas, con el fin de conocer cuáles zonas presentan un peligro inminente para los que transiten esta vía.

1.8. Ubicación de la zona de estudio

El área de estudio en general se extiende en el cuadrante entre las coordenadas 447000 E–457000 E y 1096500 N–1099600 N según la proyección CRTM-2005 de la

hoja topográfica Río Grande del Instituto Geográfico Nacional (IGN) escala 1:25000. Se ubica entre las localidades de Balsa (en las cercanías de Turrúcares) y Hacienda Vieja (en las cercanías de Orotina) sobre la RN-27, en el tramo entre los estacionamientos de los kilómetros 37+000 y 48+000; inicia unos dos kilómetros al oeste de la localidad de Balsa y finaliza en el puente del río Salitral en el sentido de San José hacia Caldera. La altitud de la zona está en el ámbito entre 200 msnm y 460 msnm como se indica en la figura 3.

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) en el que las temperaturas superan los 24 °C la mayor parte del año, hay un promedio anual de lluvia entre 1800 mm y 4000 mm; presenta una estación seca bien marcada que puede extenderse hasta por cinco o seis meses, usualmente entre diciembre y mayo.

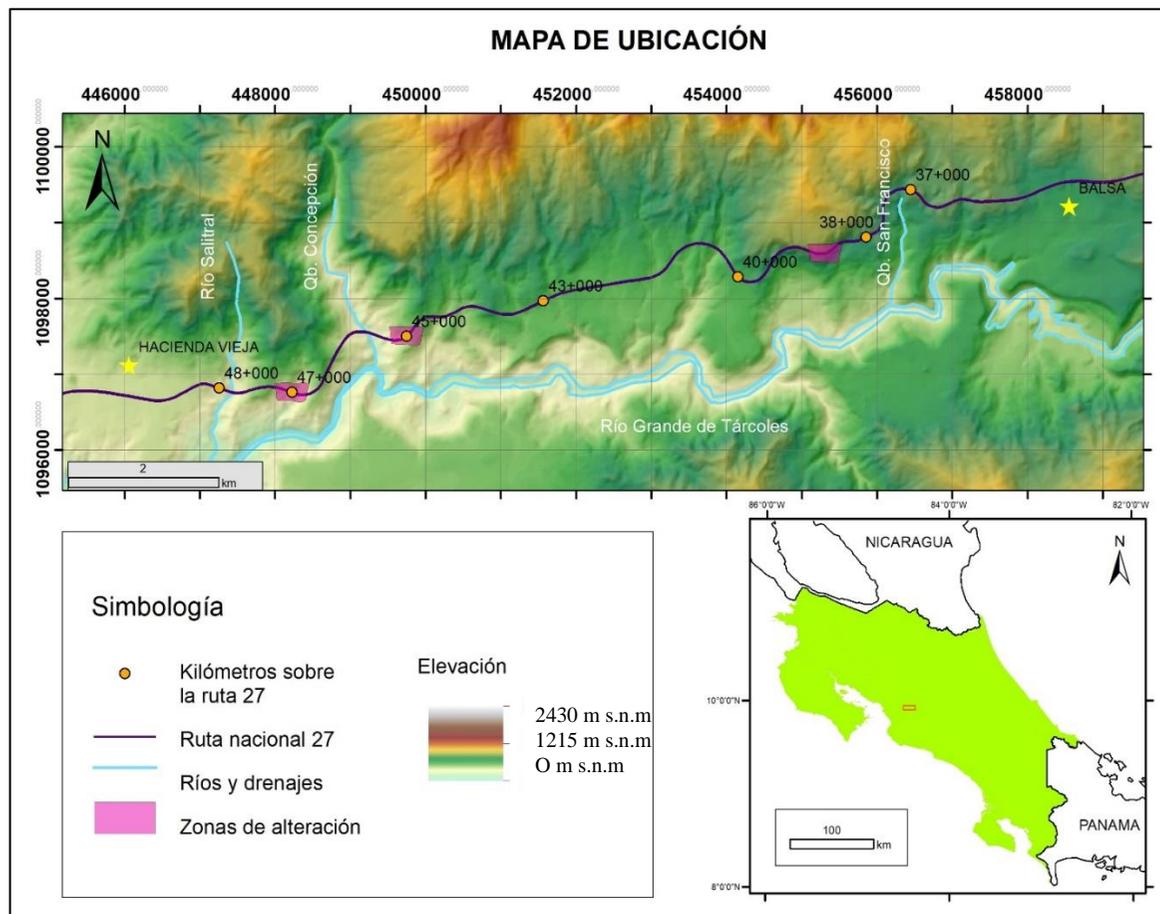


Figura 3. Ubicación de la zona de estudio del drenaje ácido de residuos-DAR en la Ruta Nacional N°27. Curvas de nivel de las hojas topográficas 1:25 000 Río. Proyecto Terra del I.G.N. Coordenadas CRTM05.

2. MARCO TEÓRICO

Se presenta el marco teórico sobre la temática de drenaje ácido de roca (DAR). Se describen aspectos de cómo, dónde y cuándo se forma, su proceso de generación y las características típicas que presenta un sitio afectado por DAR.

Aunque el término que se ha utilizado para definirlo es “drenaje ácido de mina”, es preferible utilizar “drenaje ácido de roca (DAR)”, ya que no solamente ocurre en minas. Otros sitios donde se ha identificado el drenaje ácido de rocas son: los botaderos o escombreras de minas, los depósitos de relaves o colas, los tajos, los túneles, los sitios de acumulación de minerales lixiviados y los cortes de carreteras. (USEPA 1994 & Dold 2010).

El drenaje ácido de roca (DAR), se origina cuando las rocas que contienen sulfuros, se exponen a ambientes oxidantes tales como el oxígeno atmosférico o el oxígeno disuelto en el agua. La reacción química de oxidación tiene como resultado el cambio de los sulfuros en los sólidos a sulfatos que pasan a la disolución acuosa, generando ácido sulfúrico. En el diagrama Eh-pH (Ver figura 4) del sistema Fe-O-H-S muestra que en el área de estabilidad del agua puede ocurrir una gran variedad de equilibrios heterogéneos oxidación/reducción (redox) y de pH que ocurren simultáneamente, con cinéticas distintas.

El DAR tiene el potencial de movilizar a otros elementos presentes en la roca, ya sea porque se liberan al medio acuoso o porque el aumento de la acidez de la disolución altera a la misma roca o a otras vecinas. De esta manera, puede incrementarse la concentración en el drenaje de las especies acuosas de elementos tales como el plomo, el zinc, el cobre, el hierro, el mercurio, el cadmio y el arsénico. El agua ácida cargada de elementos tóxicos disueltos deteriora significativamente la calidad del medio (Dold 2009).

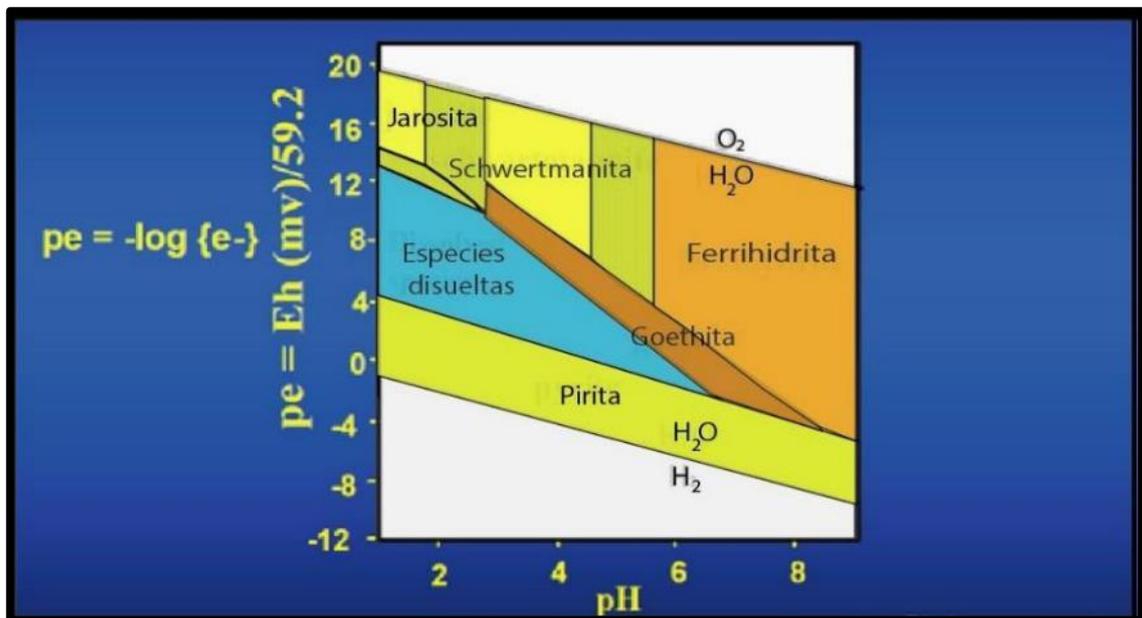


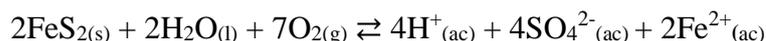
Figura 4. Diagrama de Pourbaix Eh-pH para los elementos Fe, S, O, H. Este diagrama muestra la estabilidad química de los sulfuros, sulfatos e hidróxidos de hierro en el ambiente natural. Las líneas verticales representan equilibrios ácido-base, mientras que las líneas horizontales indican equilibrios oxidación/reducción. Las líneas oblicuas son equilibrios combinados. La jarosita y la schwertmanita son sulfatos formados en ambientes oxidantes y que al disolverse generan aguas ácidas. Las especies disueltas son los iones hexaacquohierro (II), hexaacquohierro (III), sulfato acuoso, hidronio e hidróxido. (Tomado de Dold, 2009, curso de Geoquímica Ambiental, UNIA, Huelva España modificado de Bigham et al. 1996)

2.1 Procesos de generación de ácido sulfúrico

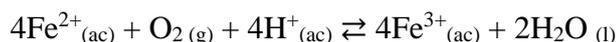
La generación de iones hidronio a partir de la alteración de las rocas, es una consecuencia de la oxidación de los minerales sulfurosos que contiene, en un proceso que consiste en varias reacciones con cinéticas distintas que dependen de la identidad del sulfuro. Por ejemplo, la marcasita y la pirita framboidal tienen una tasa de oxidación más rápida que la de la pirita cristalina, la cual se oxida lentamente (USEPA 1994 & Dold

2009). Hasta el momento, en los trabajos realizados en la RN-27, solamente se ha podido identificar pirita (FeS₂) en forma cúbica (LanammeUCR 2015). Aquí se ejemplifica en detalle la oxidación de este mineral según la información presentada por USEPA, 1994.

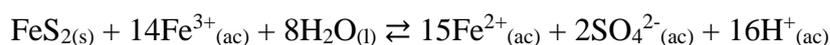
El disulfuro de hierro reacciona con agua y oxígeno



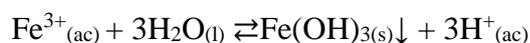
En este paso, cada átomo de azufre del disulfuro es oxidado en medio acuoso para formar el anión sulfato y generar cationes hidronio y hierro (II). El catión hidratado Fe²⁺_(ac) queda libre en disolución para seguir reaccionando. La oxidación del ion ferroso ocurre más despacio a valores de pH bajos y consume iones hidronio:



A pH entre 3,5 y 4,5, la oxidación del hierro es promovida por la bacteria *Metallogenium filamentous*. Mientras que por debajo de pH = 3,5 esa misma reacción es realizada por la bacteria *Thiobacillus ferroxidans*. El ion férrico entra en contacto con la pirita y la siguiente reacción puede ocurrir, con la disolución de más pirita:



Esta reacción genera más iones hidronio. La disolución de pirita en presencia del ión férrico Fe[H₂O]₆³⁺_(ac), en conjunto con la oxidación del ion ferroso Fe[H₂O]₆²⁺_(ac), constituye un ciclo cuyo resultado neto es la disolución de la pirita. El ion férrico precipita como hierro hidratado, con la formación de ion hidronio [H₃O]⁺_(ac) tal y como se indica en la siguiente reacción:



El Fe(OH)_{3(s)} precipita y es identificable como un depósito amorfo –de colores

amarillo, anaranjado o rojo– en los cauces o en los sitios donde el agua se estanque. A este sólido se le conoce con el nombre "*yellow boy*".

El $\text{Fe}^{3+}_{(\text{ac})}$ puede oxidar a otros minerales metálicos presentes en las rocas, tales como la galena. Al lixiviar los componentes de otros minerales se podrían liberar elementos tóxicos como el plomo y el arsénico que son muy contaminantes para el ambiente (Dold 2009).

2.2 Características típicas del DAR

El DAR se caracteriza porque las reacciones químicas de oxidación de los sulfuros en medio acuoso producen ácido sulfúrico y el pH baja a valores menores de cinco. Además, presenta los siguientes hechos (USEPA 1994; Dold 2009; Rodríguez 2010):

- Es difícil de predecir y de prevenir, aunque existen técnicas para determinar el potencial de generación de DAR en una zona.
- Muchas veces no es posible corregirlo.
- Puede permanecer latente y ser fuente de contaminación por muchos años.
- Una vez que inicia, es muy difícil y extremadamente caro detenerlo, tanto como un estimado de US\$500.000 por hectárea.
- Puede originar contaminación del agua, del suelo y hasta la desaparición de la vida acuática. El medio ácido daña directamente los tejidos de los organismos vivientes, de forma aguda o crónica. Además, la concentración intracelular puede aumentar (bioacumulación) a través de una dosificación continua de elementos tóxicos hasta alcanzar niveles letales o subletales.
- Como consecuencia del aumento de la concentración de elementos tóxicos en el agua y en la biota, los elementos entran a la cadena trófica y se puede producir la biomagnificación. La presencia de muchos de estos elementos en el agua o en los alimentos tiene efectos endocrinológicos, teratogénicos, mutagénicos, carcinogénicos y otros, incluso en humanos.

- El agua contaminada con elementos tóxicos es muy difícil de tratar.

3. METODOLOGÍA

La metodología que se utilizó en este trabajo para identificar el DAR, se presenta en la figura 5 y se detalla a continuación.

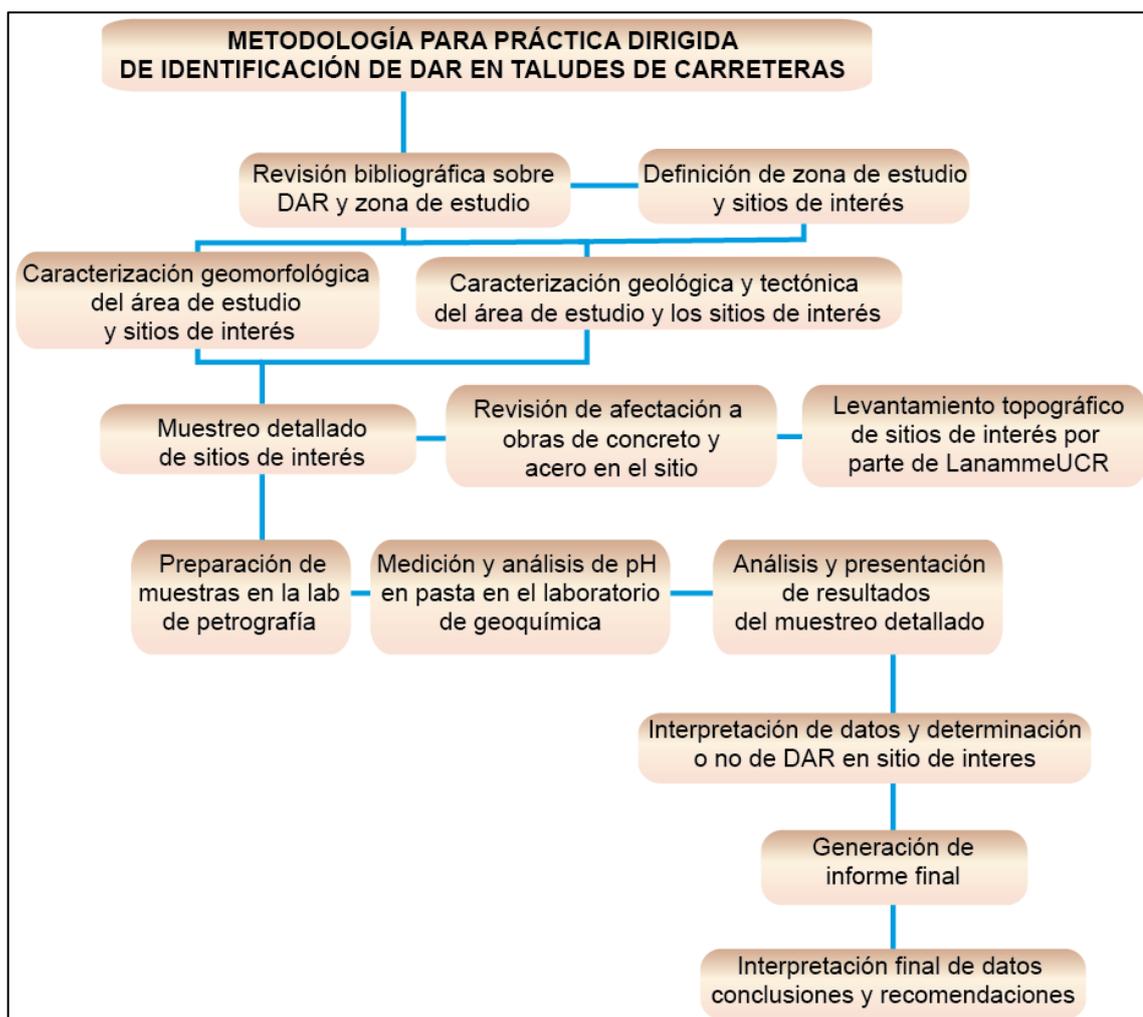


Figura 5. Diagrama de flujo con la metodología del trabajo realizada en esta práctica dirigida.

3.1 Revisión bibliográfica

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, los datos de precipitación anual y de las temperaturas máximas y mínimas, ya que estos parámetros tienen una influencia directa en la generación de DAR.

Se consultó tesis de licenciatura y maestría sobre drenaje ácido de mina y drenaje ácido de roca, técnicas de recuperación, prácticas y métodos de medición in situ y laboratorio. Finalmente, se utilizaron trabajos científicos que incluyen descripciones tectónicas, sísmicas y geológicas de la zona, para definir la geología y geomorfología regional.

3.2 Definición de zona de estudio y sitios de interés

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 imágenes satelitales y la hoja topográfica Río Grande del Instituto Geográfico Nacional (IGN) escala 1:25000 se generó un modelo de elevación digital (MED) y se ubicaron los sitios asignados para realizar el muestreo.

A partir de esto, se seleccionan tres zonas de estudio y recolección de muestras para el análisis de suelos en el laboratorio (afloramientos de roca y suelos) las que corresponden con: el estacionamiento del kilómetro 38+600 (ver figura 6), el cual se definió para la toma de muestras de roca y suelo; el kilómetro 45+000 (ver figura 7), el cual se definió para la toma de muestras de suelo/roca; y finalmente el estacionamiento del kilómetro 47+000 (ver figura 8) fue elegido para la toma de muestras de suelo.

En cada uno de los tres sitios, se eligieron muestras de roca lo más sanas posible

para la elaboración de secciones delgadas que serán usadas en la clasificación. Lo que no fue sencillo, pues en la mayoría de los casos estas se encuentran en un alto grado de alteración y prácticamente se transforman en suelo.

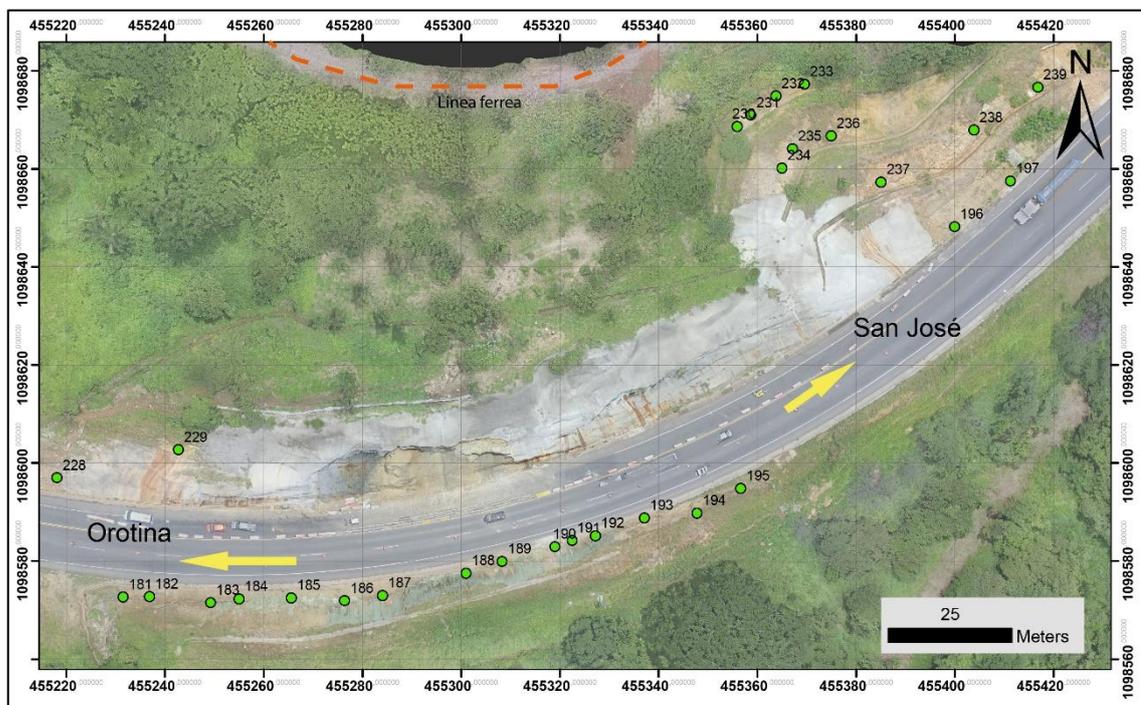


Figura 6. Ubicación de los puntos de muestreo en el talud del km 38+600. Los puntos en verde corresponden a los sitios elegidos para la recolección de muestras para análisis de pH en pasta. La línea punteada de color naranja corresponde a la línea férrea. Las flechas en amarillo sobre la carretera, indican la dirección hacia la izquierda a Orotina, hacia la derecha a San José. Se trabajó tanto el lado derecho como el lado izquierdo, donde fue posible.



Figura 7. Ubicación de los puntos de muestreo en el talud del km 45+000. Los puntos en verde corresponden con los sitios elegidos para la recolección de muestras para análisis de pH en pasta. La carretera en dirección hacia la izquierda se dirige a Orotina, hacia la derecha a San José. Se trabajó tanto el lado derecho como el lado izquierdo, donde fue posible.



Figura 8. Ubicación de los sitios de muestreo en el talud 47+000. Los puntos en verde corresponden con los sitios elegidos para la recolección de muestras para análisis de pH en pasta. La carretera en dirección hacia la izquierda se dirige a Orotina, hacia la derecha a San José. Se trabajó únicamente el lado izquierdo LI, debido a que el lado derecho LD no era posible acceder por las pendientes verticales y la cobertura en concreto sobre el talud.

3.3 Caracterización geomorfológica, geológica y tectónica

Para esta sección fue necesario un estudio geomorfológico a detalle de los taludes a trabajar, pues es de gran importancia para el entendimiento de las condiciones del sitio, el estado de las rocas aflorantes o lo que queda de ellas, así como el impacto del DAR sobre los taludes de la ruta nacional # 27. Esto, más las caracterizaciones geológico-tectónicas del área, dan un entendimiento de lo que ocurre en el espacio de estudio.

Preliminarmente, se realizó un estudio detallado de fotografías aéreas del IGN; del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT), imágenes de satélite oblicuas de

Google Earth® tomadas en diferentes momentos entre los años 2012-2017, así como fotos aéreas oblicuas de la empresa Fotos Aéreas CR® (<http://www.fotosaereascr.com/>) que fueron tomadas en la etapa previa a la apertura de la carretera entre los años 2008 – 2009, con la finalidad de conocer el estado de los taludes de previo, durante y posterior a la inauguración de la ruta.

Posteriormente, a partir de datos Lidar obtenidos por LanammeUCR, se generó la base geomorfológica detallada de los taludes en estudio y se crearon modelos de elevación digital (MED). Con los 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.

La geología y tectónica del área de estudio se obtuvo a partir de la información bibliográfica disponible en la escuela de geología, informes de LanammeUCR, tesis y estudios científicos; generando mapas y descripciones regionales y a detalle de la zona de interés.

3.4 Muestreo en detalle de taludes

El muestreo de roca y suelo de los taludes se realizó de forma sistemática en los puntos elegidos a criterio. Inicialmente, con una distribución lineal siguiendo la morfología del talud a la altura de la carretera, a una misma altura promedio según las características de cada sitio. En algunos taludes, se pudo realizar a diferente altura pues se encontraron terrazas y bermas con diferente altura, a las que se logró acceder para realizar los muestreos. Ver figuras 6, 7 y 8 de ubicación de los taludes.

Las muestras se obtuvieron limpiando la superficie del suelo y descartándola, para luego recoger entre 1,0 kg y 1,5 kg de material que se almacenó en bolsas plásticas. Por

muestra se realizó: una descripción litológica macroscópica, se determinó el porcentaje de sulfuros y la presencia significativa de carbonatos mediante la prueba cualitativa del $\text{HCl}_{(\text{ac})}$ al 10 % v/v, así como la determinación de la presencia de magnetita.

Se tomaron fotografías antes y después del muestreo, se rotuló cada muestra con un código específico y se ubicó dentro del croquis de afloramiento correspondiente. Posteriormente se llevaron al laboratorio. Se obtuvo un promedio de 30 muestras por sitio de interés, para un total de 89 muestras analizadas por medio de la metodología de pH en pasta, para determinar si ocurre drenaje ácido en los tres sitios de muestreo.



Figura 9. Recolección, rotulación y organización de muestras en los diferentes estacionamientos seleccionados. Las muestras fueron descritas, fotografiadas y rotuladas con marcador indeleble en las bolsas tanto en el exterior, como en el interior con tiquetes para evitar confusiones. **A** Recolección de muestra en estacionamiento del km 47+000, foto con pala como escala. **B** Foto en afloramiento del km 38+600. **C** Orden y confirmación de correcta rotulación de las muestras.

3.5 Revisión de impacto de DAR en obras de concreto

El trabajo consistió en revisar en los taludes el estado actual y la afectación de las obras civiles para controlar desprendimientos, erosión y manejo de agua superficial. Se revisó cunetas, contra-cunetas, concreto lanzado y el estado de las estructuras metálicas que componen todas estas obras, ya sea pernos, mallas electrosoldadas, u otros.

3.6 Levantamiento topográfico de los sitios de interés por parte de LanammeUCR

El levantamiento topográfico detallado de los taludes se realizó mediante diferentes técnicas: topografía convencional, Scanner Lidar terrestre, VANT (vehículos aéreos no tripulados) y toma de imágenes Lidar mediante vehículos tripulados, entre otros. Su uso se considera clave para el análisis geomorfológico-dimensional del sitio. Las ventajas de trabajar con estos equipos son: el detalle milimétrico, la velocidad de levantamiento de datos, la generación de MED con información de pendientes y de datos paramétricos del talud, el no tener necesidad de cerrar la ruta para realizar las mediciones entre otras.

El levantamiento topográfico que se realizó en el estacionamiento del km 45+000 se realizó con el escáner Lidar terrestre de la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional del LanammeUCR en una primera estancia, tal y como se muestra en la figura 10A. Posteriormente se obtuvieron imágenes Lidar a partir de un vuelo en Helicóptero.

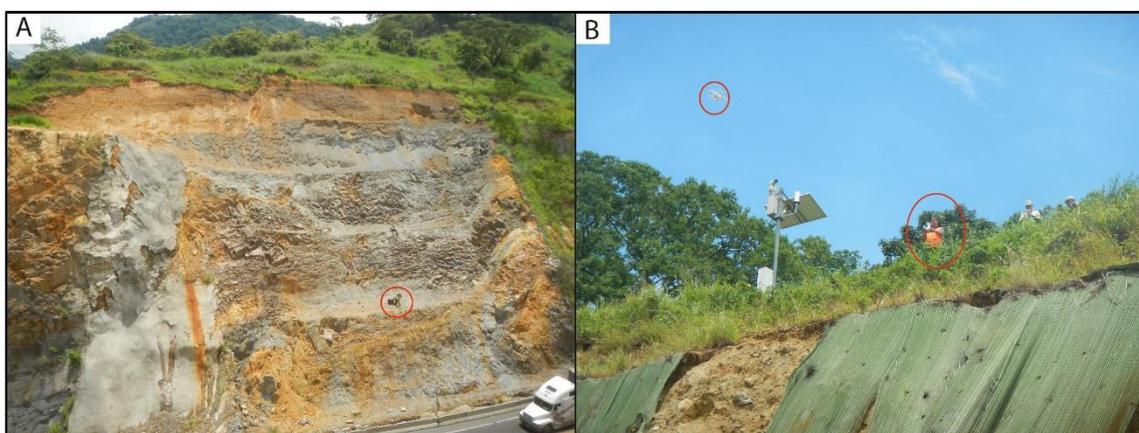


Figura 10. A. Levantamiento topográfico con Lidar Terrestre del talud sur del kilómetro 45+000. Julio 2015 **B.** Levantamiento topográfico por medio de VANT en el kilómetro 38+600. Agosto 2015. Ambos instrumentos señalados en círculos rojos.

Para el levantamiento topográfico de los kilómetros 38+600 y 47+000 se utilizaron dos vehículos aéreos no tripulados (VANT) de tipo DJI Phantom III Profesional®, que cuentan con cámaras DJI FC-300 con resolución de 12 Mega píxeles para el levantamiento de fotografías aéreas georreferenciadas. Se colocaron cuatro puntos de control con GPS (de doble frecuencia) en la zona de estudio para posteriormente realizar la ortorectificación y levantamiento topográfico con el programa Agisoft PhotoScan®. La resolución obtenida es de 3 cm por píxel, la altura de vuelo de los VANT fue de 100 m, se generaron un total de 94 imágenes con un traslape superior al 60%. La información generada fue utilizada para determinar los datos paramétricos y geomorfológicos de los taludes estudiados. Ver figura 10 B. Posteriormente se utilizaron imágenes tipo Lidar aéreas obtenidas mediante vuelo tripulado por LanammeUCR.

3.7 Preparación de muestras en Laboratorio de Petrografía

En el Laboratorio de Petrografía de la Escuela Centroamericana de Geología (ECG) de la Universidad de Costa Rica, se procedió al secado en un horno a 110 °C por un periodo de 24 horas para luego triturar y moler las muestras, en aquellos casos en los que fue necesario. Ver figura 11.

Seguidamente, se procedió a tamizar el material por la malla #10, con 2 mm de apertura. Se almacenó en nuevas bolsas plásticas rotuladas a temperatura ambiente hasta la determinación del pH en pasta en el Laboratorio de Geoquímica de la ECG.

También se realizaron tres secciones delgadas de roca procedentes de cada uno de los taludes en estudio, uno por talud, con el fin de caracterizar los afloramientos y corroborar las clasificaciones macroscópicas.

De este proceso junto con la preparación de muestras en el laboratorio Geoquímica, se generó un protocolo de tratamiento y preparación de las muestras, el cual podrá ser utilizado posteriormente en ambos laboratorios.



Figura 11. Proceso en laboratorio de Petrografía de la Escuela Centroamericana de Geología UCR. **A.** Horno de secado de muestras. **B.** Tamizado de muestras **C.** Triturador trifásico **D.** Pulverizador trifásico

3.8 Medición de pH en pasta en Laboratorio de Geoquímica

Se describe de manera general como se realizaron las mediciones. Se midió en una balanza analítica ($20,0000 \pm 0,0001$) g del material guardado en bolsas plásticas, tamizado y secado previamente en el laboratorio de petrografía (Figura 12A), con una probeta se le agregaron ($20,0 \pm 0,5$) mL de agua ultra pura con una resistividad de $18,2 \text{ M}\Omega\text{-cm}$ obtenido en el momento del purificador, con un pH en el intervalo entre 6,0 y 7,5.

Las muestras se movieron en un agitador electrónico con una pastilla magnética por 10 minutos cronometrados a temperatura ambiente (Figura 12B). Mientras tanto, se tomaron las medidas necesarias para evitar la contaminación cruzada entre las muestras o los patrones, siempre utilizando utensilios limpios. Una vez que pasan los 10 minutos,

se introduce el electrodo para hacer la medición electroquímica. Se espera a que se estabilice la medida (Figura 12C). Todos estos pasos se hacen por triplicado y se calcula el promedio de las tres mediciones.



Figura 12. Procesado de muestras en el Laboratorio de Geoquímica de la Escuela Centroamericana de Geología UCR. **A.** Pesado de muestras en balanza analítica. **B.** Agitación de muestras con agua, pastilla metálica y agitador eléctrico **C.** Medición electroquímica con pH-metro.

Se procesaron en total 89 muestras por lo que en este trabajo se realizó 267 determinaciones del pH en pasta, además de los ensayos en blanco y las réplicas de control que se hicieron como mínimo dos por cada sesión de trabajo, con lo que se obtuvo un total de 313 ensayos. En el anexo II se presenta el protocolo completo que se elaboró en este trabajo para el Laboratorio de Geoquímica de la ECG.

Estos procesos se realizan en el laboratorio para mantener la integridad de las muestras a analizar, ya que en el laboratorio se tiene mejor control y orden de las mismas, así como una mayor calidad de los análisis, todos bajo las mismas condiciones, lo que da más entereza de los datos comparado a realizarlo en el campo.

4. RESULTADOS-CONTEXTO GEOLÓGICO TECTÓNICO

A continuación, se exponen los resultados obtenidos en la práctica dirigida para cada uno de los procesos descritos en la metodología.

4.1 Caracterización geomorfológica regional

Mediante la revisión bibliográfica de artículos científicos se definió la geomorfología del sitio, con unidades informales (Porrás et al. 2012). El área de estudio comprende una región tectónica intramontana. En la figura 13 se define el mapa geomorfológico regional, basado en los relieves, inclinación y criterios geomorfológicos observados en fotografías aéreas y cartografiado digital. Se clasifica en tres unidades principales, todas corresponden a unidades denudacionales de origen volcánico:

Unidad montañosa prominente: corresponde a relieves positivos típicos de los Montes del Aguacate, relictos volcánicos del Plioceno, con formas agudas y pendientes abruptas, lo que junto al tectonismo y alteración hidrotermal favorece los deslizamientos.

Unidad de transición: sectores intermontanos ubicados entre las unidades montañosas, desde el frente montañoso del Aguacate hasta el nivel base local, que corresponde al río Grande de Tárcoles. Generan geoformas de *debris avalanche* (*hummocky*), abanicos aluviales y coluviales, en algunos casos afectados por tectónica del cuaternario.

Unidad planicie intermontana: ubicada contiguo a la unidad de transición, donde se acumula material de depositación rápida tales como epiclastos tipo *debris flow*, *debris avalanche* e ignimbritas del oeste del cañon del río grande de Tárcoles, que corresponde con depósitos típicos del cuaternario, lo que dificulta trazar con precisión las estructuras tectónicas.

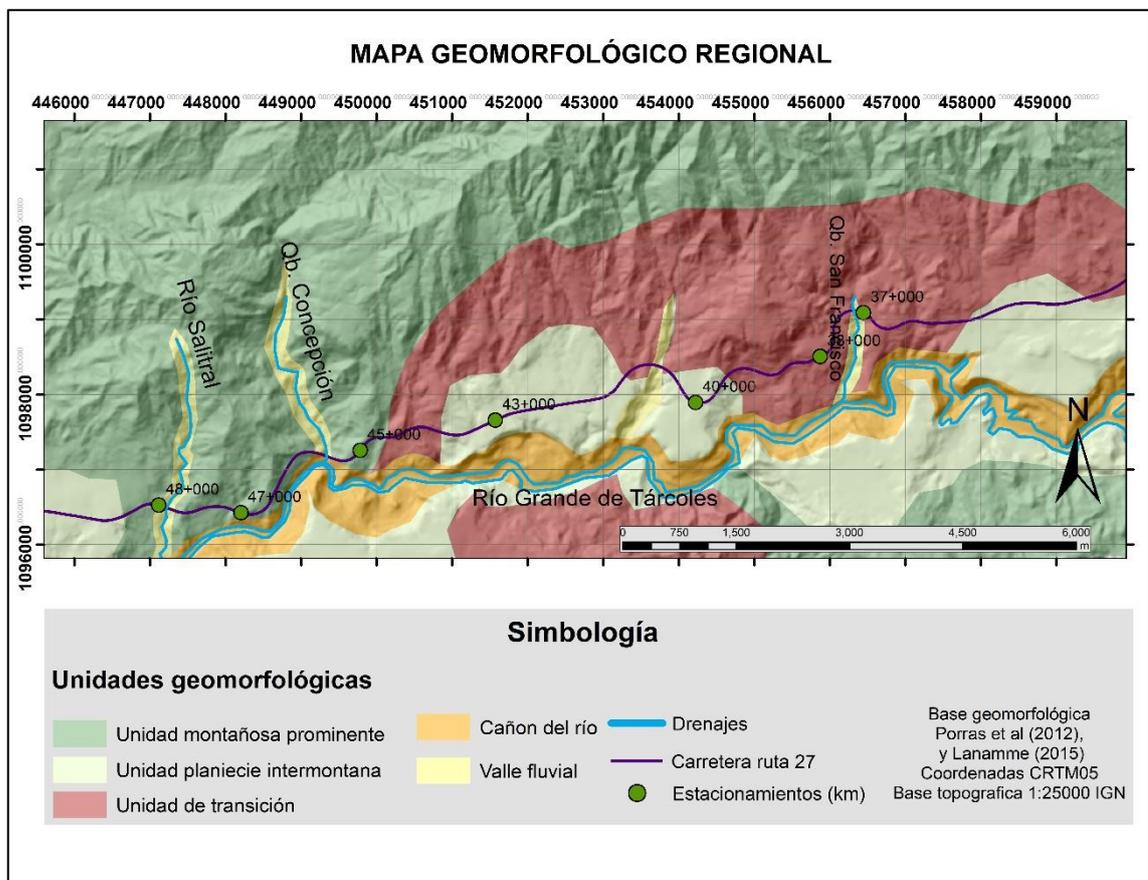


Figura 13. Mapa Geomorfológico Regional. Modificado de Porras et al. (2012) y Lanamme (2015).

4.1.2 Caracterización geomorfológica local

En general, las microcuencas de la zona analizada presentan un sistema de drenaje de tipo dendrítico a subparalelo. El agua en de los drenajes de los estacionamientos de los kilómetros 45+000 y 47+000, fluye respectivamente hacia el Oeste y Este en dirección a los ríos Salitral y quebrada Concepción, los que a su vez fluyen hacia el Sur, en dirección hacia río Grande de Tárcoles; mientras que en el kilómetro 38+600, fluye hacia el sur-suroeste, también en sentido hacia del río Grande de Tárcoles.

El trazado de la RN-27 corta prácticamente en forma perpendicular las líneas de

flujo de varios de los principales afluentes del río Tárcoles como se observa en las Figuras 13 y 14. Es posible que los drenajes subterráneos tengan un comportamiento similar, pero esto no ha sido determinado en este estudio, ni en la bibliografía consultada.

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 los 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 (LanammeUCR, 2014).

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° o 55°) y en algunos casos muy altas ($> 55^\circ$). Ver Figura 13.

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 $> 55^\circ$. Esto se define como corte en cajón, ver figura 14. Además, los materiales que fueron removidos durante la construcción de la ruta, en algunos sectores forman ahora conos de talus en las zonas de escombreras, generando zonas de corte y relleno (LanammeUCR, 2014). Este hecho genera problemas, pues si el material removido es ácido, amplía el problema de DAR, exponiendo a la intemperie zonas con sulfuros que no lo estaban antes.



Figura 14. Ejemplo de “Corte en cajón”, corte sub-vertical en los taludes a ambos lados del camino. Se observa la morfología típica de la zona de estudio y el corte $> 55^\circ$ de inclinación realizado para crear la carretera. El flujo del agua en este tipo de corte es hacia los lados del talud y hacia el frente donde se realizó el corte. Imagen aérea cortesía de fotosaereascr.com[®]. Estas fotografías son de los años 2008-2009, previas a la apertura de la carretera. Flechas amarillas sobre la carretera, hacia la izquierda el sentido Orotina y, hacia la derecha, el sentido San José.

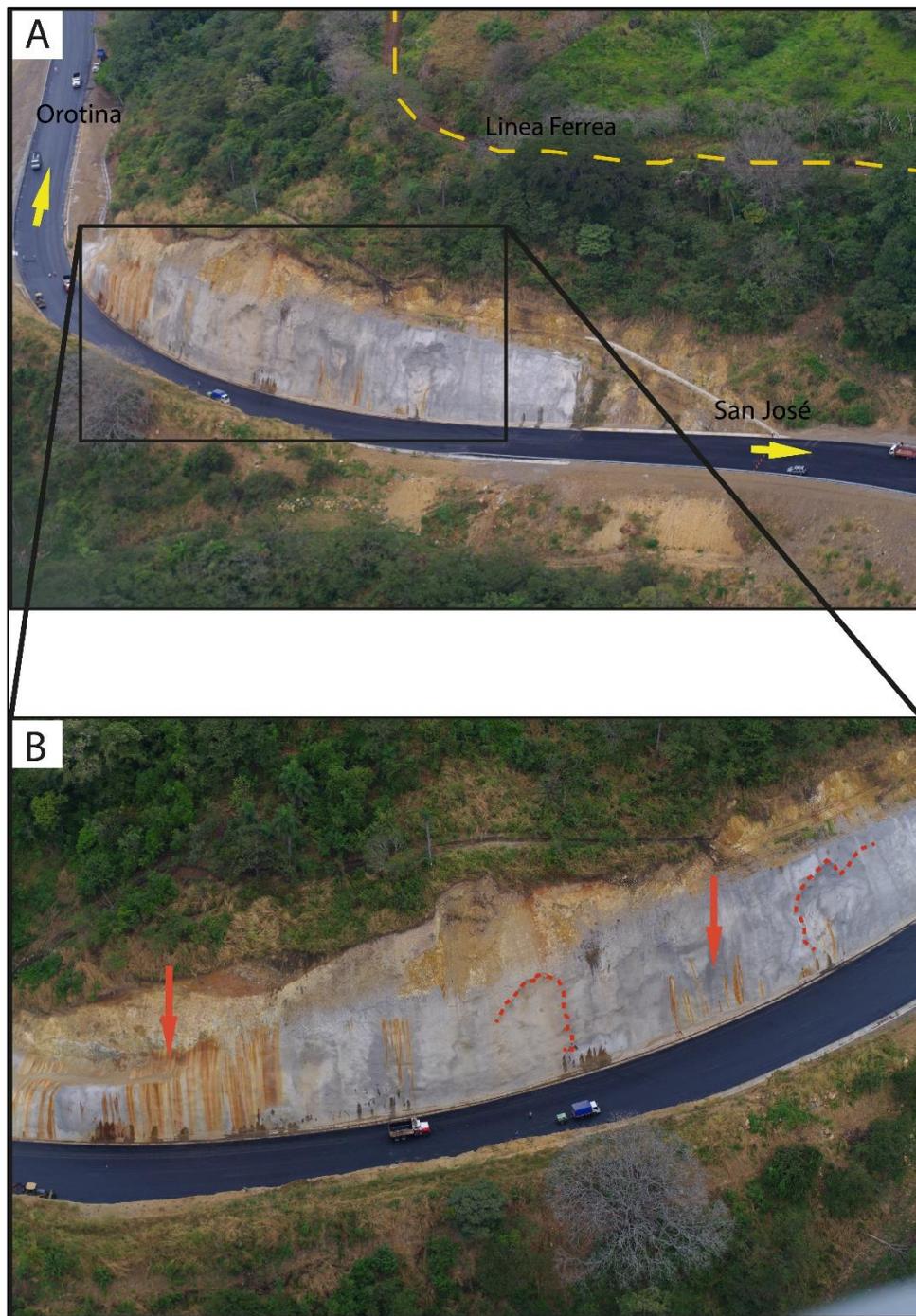


Figura 15. Fotografías aéreas cortesía de fotosaereascr.com[®] en el estacionamiento del km 38+600, mostrando el talud norte recubierto por concreto lanzado en la etapa de construcción de la carretera, previo a la demarcación, muestran una afectación prematura del talud con zonas con hundimientos y deformaciones en el concreto. **A.** Vista hacia el norte. Las zonas de color naranja sobre el concreto lanzado son producto de la oxidación

y el desgaste por escorrentía de flujos posiblemente ácidos desde la etapa inicial del proyecto. La línea en amarillo punteada demarca la línea férrea. En flechas amarillas las direcciones hacia Orotina al noroeste y San José al este. **B.** Vista hacia el noroeste. Desde esta perspectiva se observa que es un talud de corte en cajón. En las flechas rojas sólidas se indica la dirección del flujo de agua. En líneas punteadas rojas se observan indicios del desprendimiento del concreto.



Figura 16. Corte en cajón en el km 45+000, muestra la zona de trabajo previo a ser abierta la carretera. Se observa que para ese momento ya hay desprendimientos de rocas y suelos, producto de los cortes subverticales que se realizaron y que desestabilizaron el terreno. El puente en la imagen es el de la Quebrada Concepción. Imágenes aéreas cortesía de fotosaereascr.com®



Figura 17. Imagen aérea cortesía de fotosaereascr.com[®] en el km 47+000, muestra la zona de trabajo en la etapa de construcción de la carretera. Se observa un deslizamiento en la parte central de la foto. En líneas punteadas rojas, zona con desprendimiento de material, en líneas punteadas amarillas oscuras acumulación del material recolectado el cual fluye talud abajo, como lo indica la flecha. Con flechas amarillas se indica la dirección hacia Orotina al oeste y hacia San José al este.

De las figuras anteriores se observa que previo a la apertura de la carretera se presentaban problemas de deslizamientos de roca y suelo, se notan zonas inestables en los taludes de la zona de estudio, tanto los que tenían concreto como en los que no. Además, se observa por las coloraciones naranjas en el concreto lanzado de los taludes, que posiblemente ya escurrían aguas ácidas desde antes que abriera al público la carretera.

Estas fotografías de Fotos Aéreas CR[®] (<http://www.fotosaereascr.com/>) tomadas en la etapa previa a la apertura de la carretera entre los años 2008 – 2009 son un importante aporte, demuestran que se hicieron cortes subverticales en gran parte de los

taludes para crear la carretera, además que había problemas de estabilidad y muy posiblemente aguas ácidas en los taludes de estudio de este proyecto, los cuales no fueron considerados y presentaron problemas desde antes de la apertura de la ruta.

Para la determinación de la morfología de los taludes de este estudio, se definió que el sentido San José-Orotina correspondiente al talud norte, sea el *lado derecho (LD)* y que el sentido Orotina-San José correspondiente al talud sur, sea el *lado izquierdo (LI)*.

4.2 Caracterización geológica regional

Para crear 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 el área aflora parte de la estratigrafía del extremo occidental del Valle Central y las estribaciones de los Montes del Aguacate. (Ver figura 18). En forma general, el área de estudio se dividió en tres unidades geológicas, de la más antigua a la más joven:

1. *Formación Grifo Alto*, asociado a coladas de lava y brechas volcánicas, 2. *Unidad de Epiclastos varios*, se trata de una unidad informal 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. A menor escala, también hay algunos aluviones ubicados en barras de punto a lo largo del río Grande de Tárcoles, asociados al cuaternario.

Aunque en este trabajo en particular no se describe el basamento —el cual no fue visto aflorando en la zona de estudio— este corresponde a las formaciones sedimentarias Turrúcares y Peña Negra del Neógeno, que comprenden a areniscas, lutitas y tobas de diferente composición; ambas son importantes en cuanto la deformación presente en la

zona.

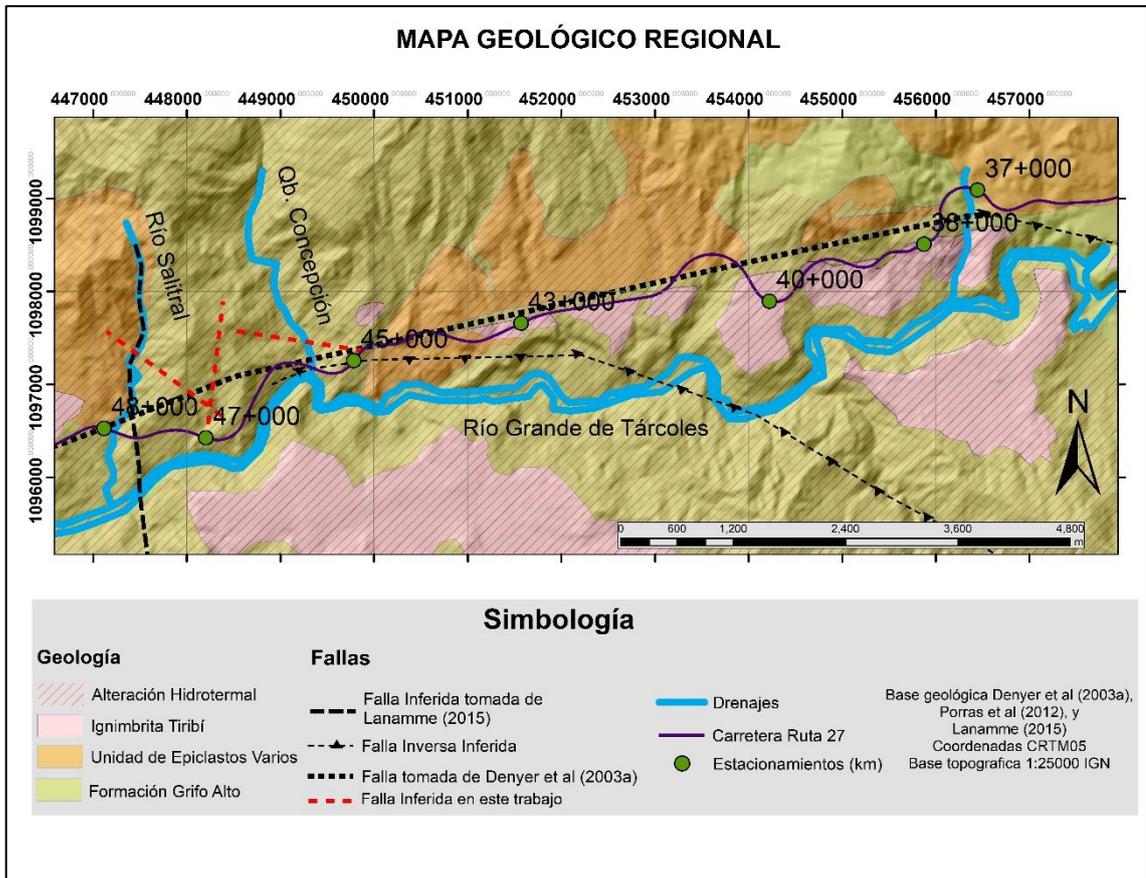


Figura 18. Mapa Geológico Regional. Modificado de Denyer et al. (2003^a), Porras et al. (2012) y LanammeUCR (2015).

Formación Grifo Alto (Plioceno, 3-5 Ma)

Denyer y Arias (1999) las describen como rocas volcánicas andesíticas (aunque se pueden encontrar también basaltos y dacitas, estos son más escasos) y piroclásticas que cubrieron las secuencias sedimentarias y volcánicas post basculamiento, contemporáneas a la formación depósitos de avalancha ardiente. Los flujos piroclásticos son gruesos con sostén por matriz, lodosa “cocinada” evidenciando depositación en caliente $>100\text{ }^{\circ}\text{C}$. En algunos casos se encuentran silicificadas.

Porras et al. (2012), describen esta formación como rocas profundamente hidrotermalizadas, compuestas por lavas, brechas y depósitos epivolcánicos (depósitos fluviales de corrientes hiperconcentradas con fragmentos de 1 cm a 25 cm de diámetro; y depósitos de *debris avalanche*) bloques andesíticos vidriosos, monomícticos en matriz de ceniza vitro-cristalina. Sucesión inclinada (N40°W/30°). Los cortes de carretera dejan entrever la estructura interna de un antiguo estratovolcán, debido a la presencia de cuerpo hipoabisales y zonas con fuerte alteración hidrotermal (entre las quebradas Salitral y Concepción). Las coladas de lava están muy meteorizadas y tectonizadas.

Formación Tiribí (Cuaternario, 322000 a)

Datada cuaternario superior 322±2ka (Pérez et al., 2006) constituye mesetas o está rellenando paleocanales. Sobre yace a la formación Grifo Alto y se compone de ignimbritas con distintas facies de enfriamiento bien diferenciadas:

- a) la facies de brechas y de ignimbritas ricas en *fiammes* y bombas decimétricas (pómez vesiculares negras) color gris oscuro, típica de los alrededores de la Garita-Río Grande.
- b) Las facies bien soldadas, color gris claro, similares a un sillar, denominadas de Orotina. Se encuentran facies con grandes bombas negras (5 % - 15 %), decimétricas normalmente [5-50] cm de diámetro, algunas con bordes vidriosos, algunas con bordes vidriosos, clastos de obsidiana, líticos no juveniles de hasta 20 cm de diámetro en matriz de ceniza rica en vidrio.

4.2.1 Caracterización geológica local

Las rocas analizadas, corresponden únicamente 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 por 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 (Porras et al., 2012).

Específicamente en los sitios analizados de los estacionamientos de los kilómetros 45+000 y 47+000 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 desintegración total de la roca. Ver figuras 19 y 20.

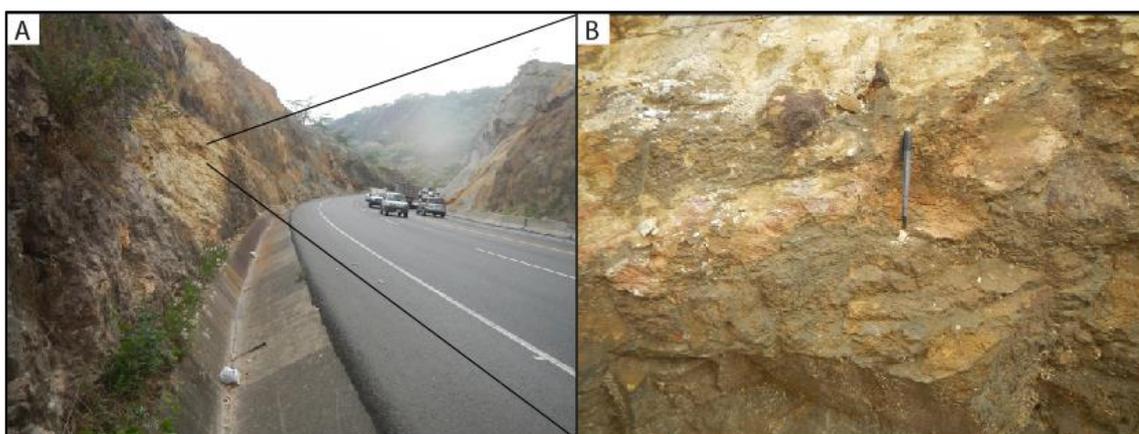


Figura 19. A. Colada andesítica de la Formación Grifo Alto en estacionamiento del km 45+000. Las rocas presentan silicificación producto de la alteración hidrotermal y DAR. B. Acercamiento de imagen de la izquierda, con lápiz como escala.

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, se limitan a las cercanías de las fracturas principales y fallas. Predominan los sitios con gran degradación de los

materiales. En general, el porcentaje de pirita es superior al 5% en algunos casos está en toda la matriz y se presenta como una “exudación” recubriendo toda la superficie de la roca.

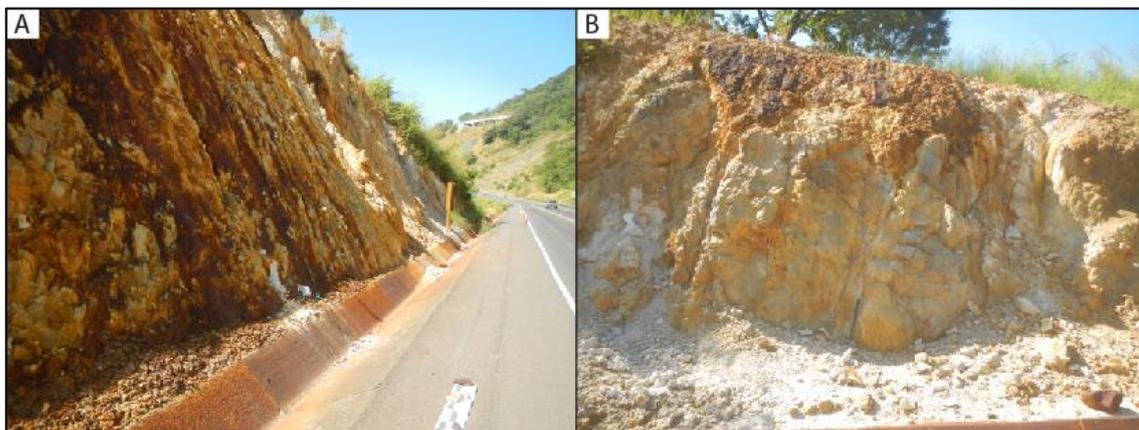


Figura 20. **A.** Afloramiento con amplia arcillitización, alteración hidrotermal-degradación y DAR en lavas andesitas de la Formación Grifo Alto en el estacionamiento del km 47+000. **B.** Vista frontal del talud lado izquierdo.

Es común encontrar vetillas < 2 cm de calcita generando una fuerte reacción al HCl. Se observan plagioclasas hinchadas y magnetismo. En varios sitios se observó alteración en pátinas de hierro y manganeso (óxidos de hierro, óxidos de manganeso), hematita y goethita, así como silicificación. Se observó que las zonas con silicificación se limitan a fracturas y no hay reacción al HCl en las zonas cercanas a su aparición.

En el estacionamiento del kilómetro 38+600 de la ruta nacional 27, afloran brechas volcánicas andesíticas, monomíticas, con clastos de 1 cm a 1 m de diámetro en promedio (< 3 m) y matriz con presencia de sulfuros como pirita y gran cantidad arcillas ricas en azufre. Ver figura 21. También son frecuentes la presencia de cristales sulfatos milimétricos a centimétricos.

Las tonalidades de colores varían entre blancuzco, verdoso, gris, naranja, rojizo y

café. En algunos casos principalmente en la parte superior del talud se observa estructuras enrejadas tipo “*stockwork*” con óxidos de hierro en las fracturas. Ver figura 22 B.

Las plagioclasas alteradas de los bloques subangulares y subredondeados de la brecha, no reacciona al HCl, algunos de estos bloques presentan leve a moderado magnetismo, lo que indica la presencia de magnetita en su composición.

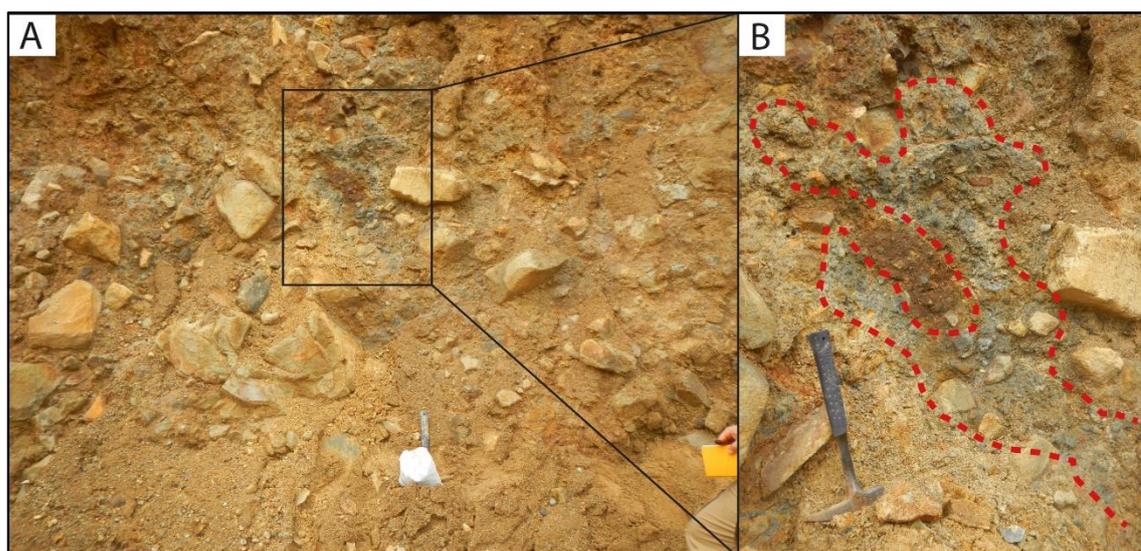


Figura 21. A. Brechas monomícticas de la Formación Grifo Alto en el estacionamiento del km 38+600. Piqueta como utilizada como escala. **B.** Acercamiento en zona con alteración y lixiviados de pirita y azufre en colores naranjas y grisáceos. Rocas silicificadas demarcadas entre las líneas en puntos rojos.

Es común percibir un fuerte olor a azufre y a ácido sulfúrico, que proviene de las arcillas de la matriz de la brecha y de las fracturas/fallas. Hay partes de los taludes (especialmente en los bordes externos) con rocas afectadas por los procesos normales de meteorización en una zona tropical, con diferentes grados de alteración, que van desde poca alteración, hasta la degradación casi completa de los minerales originales constituyentes de las rocas.

En las zonas donde predomina la presencia de alteración hidrotermal, las rocas

presentan procesos de arcillitización degradándose completamente hasta convertirse en suelo, pero paralelo a esto en algunos sitios principalmente cerca de fracturas, ocurre también silicificación principalmente con tonalidades blancuzcas a grisáceas, con presencia de óxidos de hierro y óxidos de manganeso, en las fracturas, tornando las rocas más duras y resistentes a la meteorización y erosión.

Se observó estructuras en forma de ductos enrejados tipo “*stockwork*”, así como sulfatos y yeso. Es común encontrar magnetita en los clastos de la brecha; mientras que el azufre y la pirita se encuentran lixiviados, principalmente en la matriz.

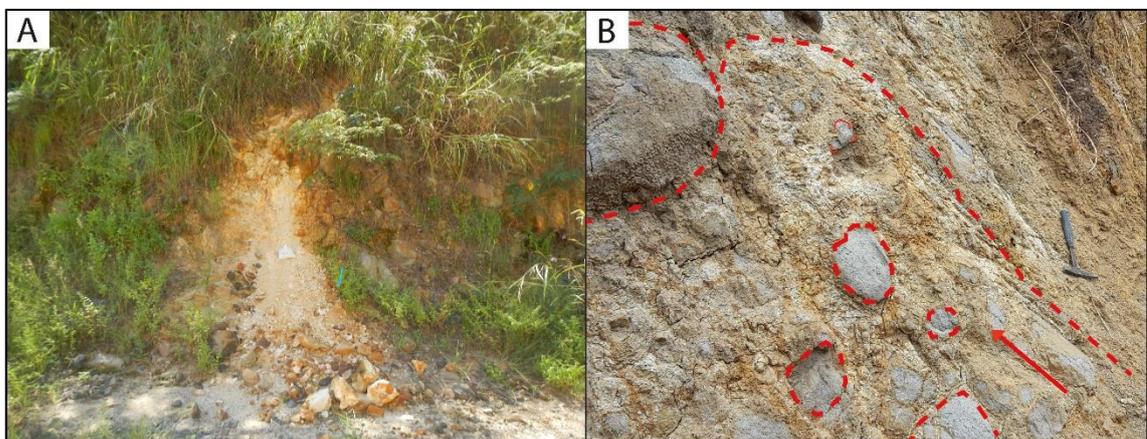


Figura 22. **A.** Efecto de arcillitización, rocas convertidas en suelo por alteración hidrotermal y meteorización. Ejemplo en estacionamiento del km 47+000. En los sectores con mayor acidez no hay crecimiento de vegetación. **B.** Brecha y ductos o *pipes* por donde suben los fluidos hidrotermales que degradan las rocas en estacionamiento del km 38+600. Las rocas fueron alteradas a arcilla y se convierten en suelos. La flecha en rojo indica el sentido de movimiento ascendente de los fluidos. Piqueta como escala.

4.3 Caracterización tectónica regional

Costa Rica se localiza al sur del istmo centroamericano, donde el contexto geodinámico de su entorno es complejo, debido a la interacción de las placas del Coco,

Caribe, Nazca y la microplaca de Panamá. (Ver figura 23, marco tectónico regional). El área de estudio incluye extremo occidental del Valle Central y las estribaciones de los Montes del Aguacate.

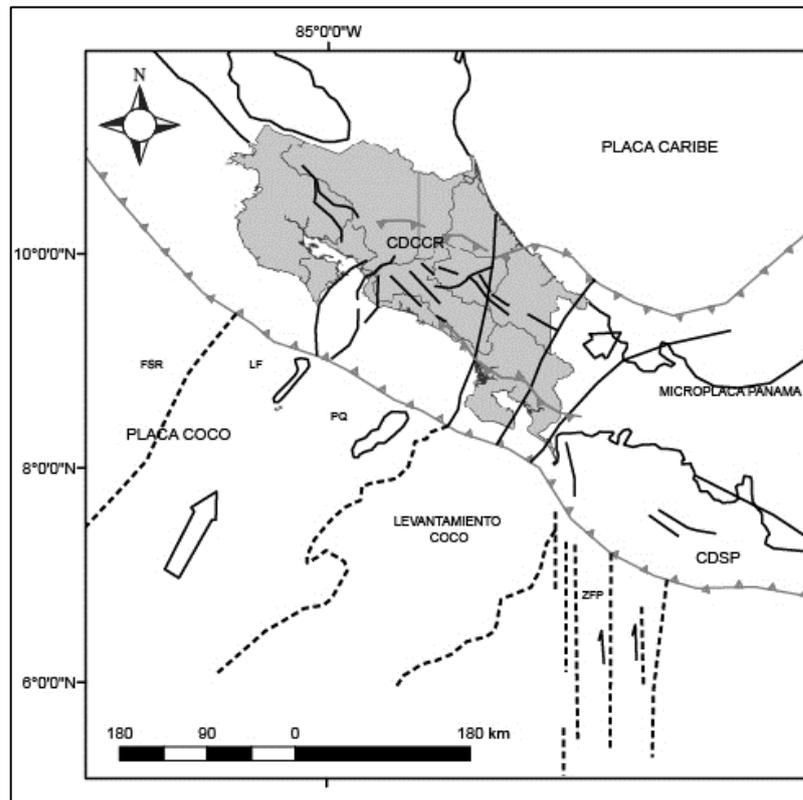


Figura 23. Marco tectónico regional. Las líneas indican el movimiento relativo de las placas. Simbología: CDCCR: Cinturón deformado del centro de Costa Rica, FSR: frontera suave rugosa, LF: levantamiento de Fisher, PQ: *plateau* de Quepos, ZFP: falla transformada de Panamá, CDSP: cinturón deformado del sur de Panamá. Modificado de Montero (2001)

Según Arias & Denyer (1991) el área presenta plegamiento, fallamiento y basculamiento por una compresión que ocurrió de S a N, y que actuó desde el cretácico hasta el presente. Mencionan que el fallamiento es transcurrente diestro en las fallas NW y siniestro en las fallas NE. Los mismos esfuerzos generaron fallas inversas este-oeste y fallas transtensionales norte-sur. Posterior a la compresión Mio-Pliocena se produjo el rejuvenecimiento de la subducción, con la migración del arco magmático hacia el NE

hasta su posición actual representada en la cordillera volcánica central. Arias & Denyer (1991)

Las fracturas con rumbo este-oeste originadas por la descompresión norte-sur, fueron aprovechadas por los fluidos hidrotermales para su ascenso, colaborando con el ascenso de fluidos hidrotermales, que silicificaron las rocas, rellenando parcial o totalmente con cuarzo las fracturas tensionales. Durante el periodo de relajación además de generarse el fracturamiento este-oeste, las fallas que se comportaron como transcurrentes, tuvieron un comportamiento gravitacional. (Arias & Denyer, 1994)

El tipo de fracturamiento, fallamiento y plegamiento de la zona, se podría explicar por un sistema de corrimientos con componente de rumbo sinistral (Montero, 1999).

A partir de datos sísmicos de 20 años de registro sistemático en la región, del año 1992 al 2010 correspondientes a sismos de baja intensidad a una profundidad entre 0-10km, se determina que es una posible zona de despegue del sistema de corrimiento regional. La Falla Tárcoles, descrita como una falla doble sinistral, muestra una extensión considerable para Costa Rica, alrededor de 90 km, podría representar una falla de desgarre importante, dado que a partir de esta surgen los principales corrimientos de la zona de estudio (Montero, 1999).

Porras et al. (2012), realizan análisis de quiebres de pendiente (elevación con respecto a la longitud del cauce) o retroceso del cauce (*knickpoints*) y evidencian perturbación en el estado de erosión, lo que es relacionable a un rasgo tectónico en los ríos principales del área. Los mecanismos focales indican un sistema de fallas inversas con componente de rumbo.

Porras et al. (2012), observaron cuatro zonas de falla cortando las rocas de la Formación Grifo Alto, evidenciando un patrón estructural más complejo que el propuesto hasta la fecha. Principalmente fallas inversas de bajo ángulo con un estilo de deformación de piel fina (*thin skinned*) que no involucra al basamento durante la deformación. Para

este estudio consideraron la geometría de la falla principal, el comportamiento mecánico del basamento y la respuesta de la cobertura sedimentaria.

Las cuatro estructuras mayores corresponden con la zona de falla Escobal, la zona de falla Balsa, la falla Río Grande y la falla Turrúcares, todas paralelas entre sí con dirección NW-SE. La falla Balsa está asociada a un pliegue con orientación NW-SE. Se resumen las cuatro estructuras descritas por Porras et al. (2012) a continuación:

Falla Turrúcares: es una falla inversa con orientación NW-SE, que se inició en el Plioceno-Pleistoceno, se identificó un lineamiento asociado a anomalías en la red de drenaje. Está cortando los depósitos de la Formación Grifo Alto.

Falla Río Grande: se observó cortando los depósitos de la Formación Tiribí, y se estima que es de edad cuaternario, presentando un plegamiento asimétrico con superficie axial en dirección NW-SE convergencia al NE. Las estimaciones geométricas y el grado de deformación observado sugieren una profundidad menor a 1000 m.

Zona de falla Balsa: tiene una disposición predominante N35°W, 70°SW, tipo inversa sinistral, afectando las unidades de *debris avalanche* y la Formación Grifo Alto. La fuerte tectónica genera fracturas verticales con rumbos N20°W, con una extensa zona de alteración hidrotermal, por la que se cree habrían subido los fluidos hidrotermales generando un enrejado complejo, dificultando el reconocimiento del buzamiento original.

Zona de falla Escobal: es una falla inversa con componente de rumbo y abarca toda el área de estudio, tiene un rumbo predominante NW-SE, y una edad Plioceno Inferior. Es causante del desarrollo de importantes alteraciones hidrotermales de la zona.

En base a esto, Porras et al. (2012) proponen que las primeras estructuras en formarse en la zona, son los corrimientos Escobal y Balsa, que se encuentran directamente relacionadas con la zona de desgarre Falla Tárcoles. Esta deformación se vincula con el empuje proveniente de estructuras profundas en el sector oriental del área de estudio.

Estas estructuras se encuentran afectadas por los fluidos hidrotermales y cortan únicamente los depósitos de Grifo Alto.

4.3.1 Caracterización tectónica local

Localmente la tectónica es compleja debido a la extensa alteración hidrotermal y meteorización-degradación de las rocas. Específicamente en el área de trabajo correspondiente a los estacionamientos de los km 45+000 y 47+000, se encontraron algunas estructuras, las cuales no fue sencillo medir. En el km 38+600, particularmente, no fue posible medir planos debido al grado de alteración de las rocas, las cuales fueron prácticamente degradadas a arcilla.

En el cuadro 2, se ubican los planos de falla medidos en campo que comprende zonas afectadas por fallas sub-verticales. En todas hay presencia de arcillas, pirita, azufre; en algunos casos sílice, sulfatos y yeso rellenando fracturas. En varios casos no es posible medir planos ni sentidos de movimiento, debido a la arcillitización y degradación de las rocas, lo que induce a que se definan como zonas de falla.

Cuadro 2. Fallas medidas en los estacionamientos estudiados. Se observó correlación

principalmente con las zonas de falla Escobal y Balsa descritas por Porras et al (2012), las cuales coinciden con las direcciones medidas en campo en este estudio. Las fallas medidas y descritas por Porras et al. (2012) ver figura 18, se encuentran en las cercanías de los afloramientos analizados en este estudio y los están afectando directamente.

Planos de falla (DB)	Coordenadas CRTM-05 (E-N)		Sitio de Muestreo (estacionamiento/muestra)
1. 191/86	448995	1097503	km 47+000
2. 095/88	448263	1096760	km 47+000/219
3. 285/74	448263	1096760	km 47+000 /219
4. 010/082	449642	1097437	km 45+000/159
5. 99/73	448196	1096757	km 47+000/199
6. 93/80	448200	1096757	km 47+000/200
7. 221/81	448232	1096747	km 47+000/205
8. 288/78	448243	1096745	km 47+000/206
Zona de Falla sin buzamiento aparente	448225	1096741	km 47+000/210

Se concluye, que los tres afloramientos estudiados corresponden a zonas de falla.

Las estructuras implican el punto de salida de los fluidos hidrotermales causantes del DAR en la zona de estudio, principalmente las estructuras que fueron medidas en los estacionamientos de los km 45+000 con rumbo predominante al NW-SE y del km 47+000 con rumbo predominante N-S y NW-SE. Aunque en el km 38+600 no fue posible medir estructuras por la morfología de los taludes y el grado de degradación de la roca, se estima basado en el nivel de deterioro, que el estacionamiento se presenta como una zona de falla, ver figura 18.

En el capítulo 5, en las secciones de mediciones de pH en pasta por estacionamiento, se muestra mediante figuras y resultados como se comportan los fluidos y los puntos de salida de los mismos, coincidentes con las fracturas-fallas vistas en campo.

5 ANÁLISIS ESPECÍFICO POR TALUD. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS, GEOLÓGICOS-PETROGRÁFICOS, MINERALÓGICOS, DETERMINACIÓN DE pH EN PASTA Y AFECTACIÓN DE OBRAS DE CONCRETO

Como se mencionó en la sección 4, en estos sitios afloran coladas de lava andesítica masiva y brechas andesíticas monomícticas de la formación Grifo Alto de edad Plioceno, afectadas por fallas tectónicas, fracturas, alteración hidrotermal, y como se demuestra en este trabajo DAR. Todo lo anterior, más los procesos normales de meteorización en una zona tropical húmeda, las rocas presentan diferentes grados de alteración, que va desde poca hasta la degradación completa de los minerales originales constituyentes de las rocas.

En la descripción morfológica de los taludes, se usó por convención que el sentido San José-Orotina correspondiente al talud norte, sea el *lado derecho (LD)* y el sentido Orotina-San José correspondiente al talud sur sea el *lado izquierdo (LI)*.

5.1 Estacionamiento del km 38+600

Este sitio corresponde con una sección de corte en cajón, con taludes de corte subvertical a ambos de la carretera. Ver figuras 24, 25, 26, 27, 28, 29 y 30.

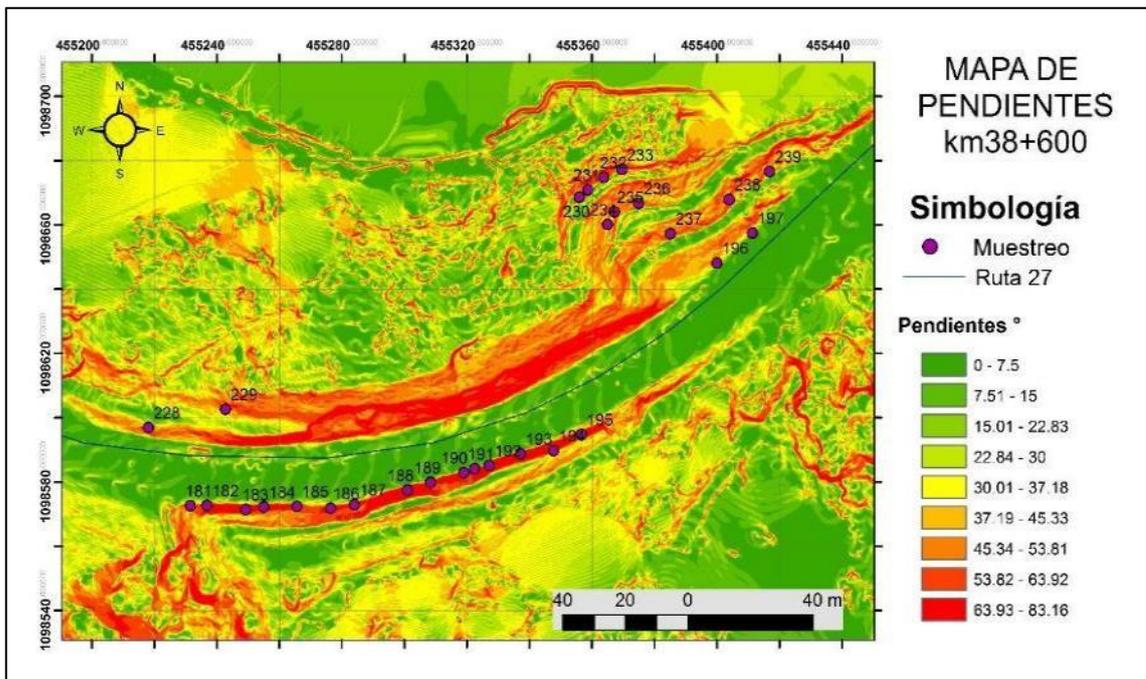


Figura 24. Mapa de pendientes en el estacionamiento del kilómetro 38+600. Se muestran las zonas elegidas para obtener muestras para la determinación de pH en pasta.

5.1.1 Morfología

El lado derecho (LD) tiene una altura máxima de 48 m, correspondiente a la línea férrea; sin embargo, el talud tiene una altura de 35 m frente a la carretera, correspondiente a la zona de muestreo, coincidiendo con la parte superior de concreto lanzado. Ver figura 25. Presenta una sección de unos 190 m de longitud con concreto lanzado y otra sección de menor longitud de 84 m sin protección superficial, con al menos tres bermas separadas por cunetas y contra cunetas.

Las pendientes de las zonas que están cubiertas con concreto lanzado oscilan entre 35° y 90° (ver figuras 25 y 26). En el sector de las bermas, las pendientes son cercanas a los 35° y solamente en la parte superior las pendientes son entre 8° a 35°, posiblemente este sector aun preserva la pendiente original de la zona. Por la dirección de las pendientes y los cambios de altitud de hasta 50 m, es muy probable que las líneas de flujo del agua dentro del macizo tengan dirección de norte a sur, por lo tanto, los fluidos tratan de buscar salida en el frente del talud cubierto por el concreto lanzado, lo que genera una carga hidrostática, lo que sumado al DAR como se demuestra a continuación en esta sección, provoca generación de sulfatos, inestabilidad y desprendimiento del concreto lanzado.

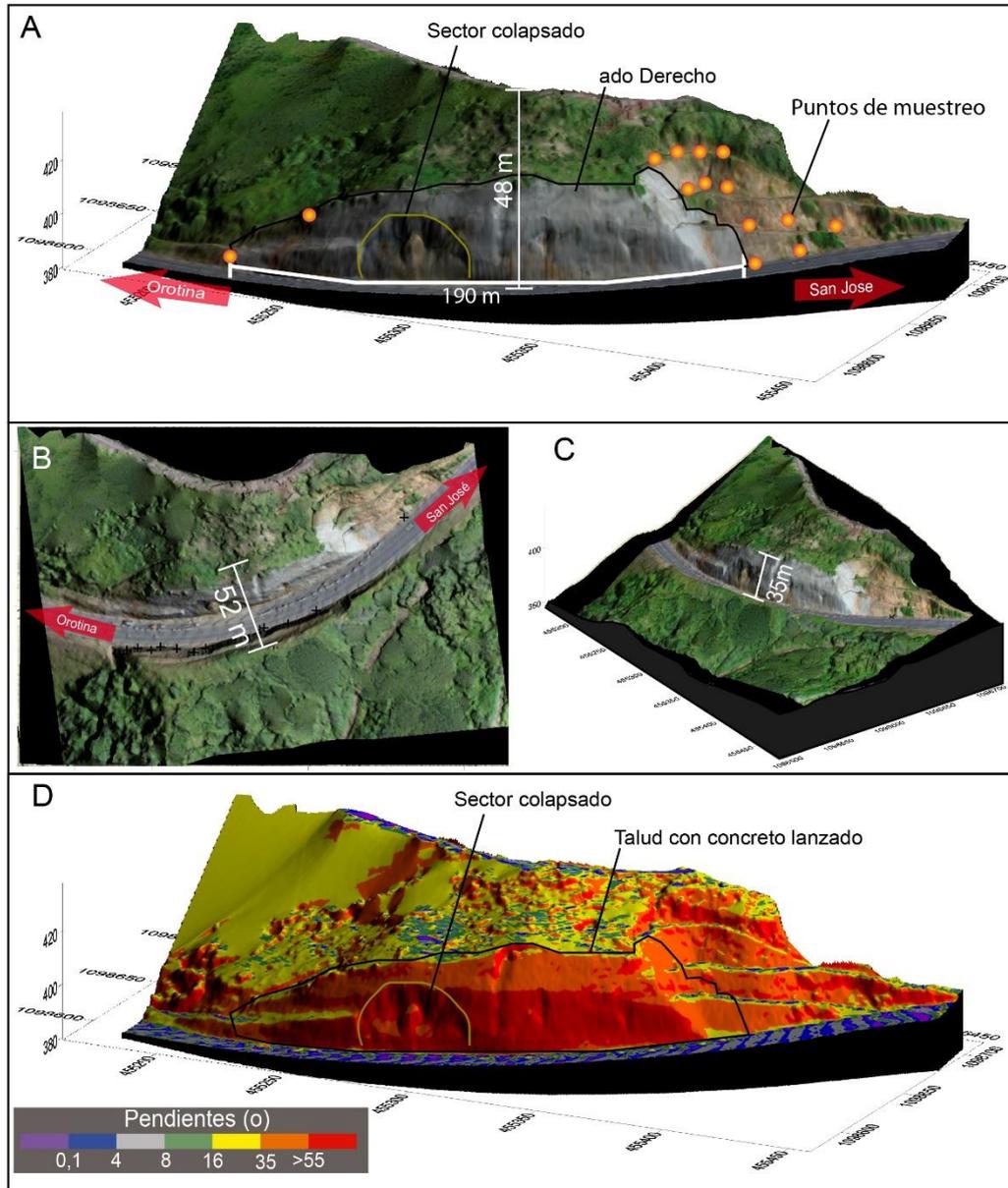


Figura 25. Tomada y modificada de Ruiz, P., Naranjo., R., Valverde, C., Garro. & Barrantes., 2015: Informe de evaluación y fiscalización, ruta nacional No. 27 taludes km 38+600, LM-PI-UGERVN-008-2015 – 116 pp. Universidad de Costa Rica Programa Infraestructura del Transporte (PITRA) LanammeUCR, San José: Modelo tridimensional del lado derecho del estacionamiento en el km 38+600, generado a partir de datos Lidar obtenidos mediante VANT. **A.** Altura máxima, sitios de muestreo y sección de concreto colapsado (LD). **B.** Distancia entre los puntos más altos de los taludes de corte. **C.** Vista

oblicua superior del talud norte. **D.** Pendientes en grados, lado derecho.

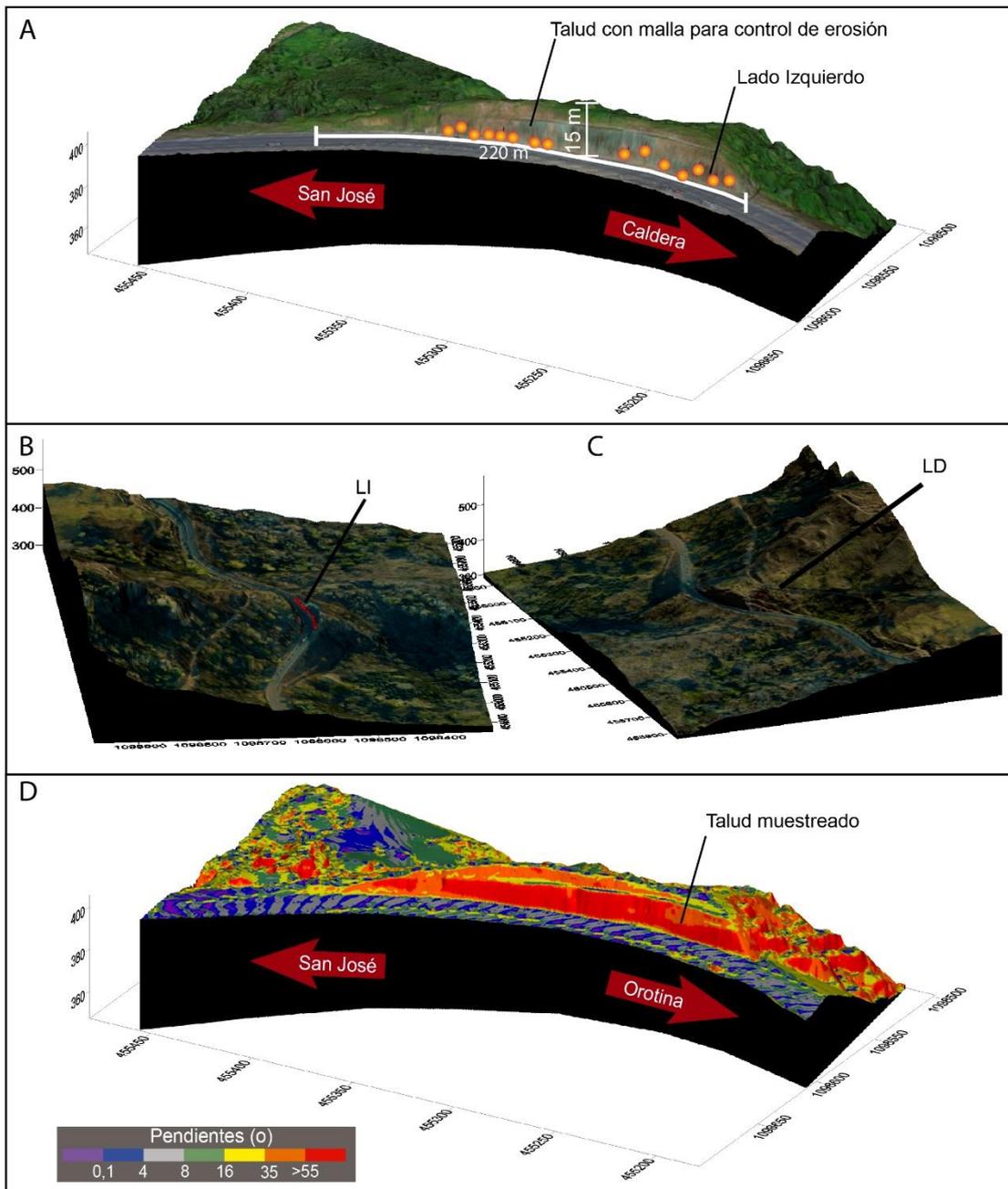


Figura 26. Modelo tridimensional del lado izquierdo del estacionamiento en el km 38+600, generado a partir de datos Lidar obtenidos mediante VANT. Modificado de Ruiz et al. (2015) **A.** Altura máxima, sitios de muestreo y malla para control de erosión. **B.** Vista lateral, viendo al este. **C.** Vistas lateral viendo al oeste. **D.** Pendientes en grados del talud, lado izquierdo.

Este talud contaba con un muro de concreto, sostenido por varillas de acero No. 4 que funcionaban como una especie de ancla y drenajes subhorizontales incrustados en la roca meteorizada para controlar los procesos erosivos, dar soporte contra deslizamientos y generar estabilización, sin embargo, desde su creación a la actualidad, se ha desprendido en varias ocasiones, Lanamme (2015), lo que demuestra que este tipo de solución no es la adecuada.

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

En el momento del muestreo y caracterización, este talud estaba parcialmente cubierto por un manto para control de erosión, anclado con pines de acero. En agosto del 2016, este manto cubría casi la totalidad del talud. Debido al paso del tiempo y la exposición a los elementos naturales, se ha deteriorado severamente, y para el momento del muestreo prácticamente no cumple ninguna función. Por la dirección de las pendientes y los cambios de altitud, es probable que en este talud existan dos líneas de flujo: una hacia la carretera y otra siguiendo lo que era la topografía original antes del corte de la carretera, hacia el sur.

5.1.2 Geología

En este estacionamiento aflora brechas volcánicas andesíticas monomíticas correspondientes a la Formación Grifo Alto. Poseen una matriz predominantemente arcillosa, aunque ocasionalmente se observa silicificación junto las facturas principales. Los bloques de lava comprenden un 40 % de esta unidad, son subangulares a subredondeados y tienen diámetros centimétricos a métricos (< 3m). Se observó azufre y pirita diseminados en la matriz, pero no en los bloques. Es frecuente la presencia de sulfatos y cristales milimétricos de yeso. No se observó calcita ni reacción al HCl 10% v/v. Ver figura 27.



Figura 27. Ejemplos de brechas monomíticas de la formación Grifo Alto, en el lado izquierdo del estacionamiento del km 38+600. **A.** Se muestra el tamaño de los clastos. **B.** Se observa a la izquierda de la imagen, los restos de la malla de control de erosión en mal estado.

Tienen coloraciones grisáceas-verduzcas a beige-blancuzcas cuando están sanas, principalmente hacia la cima del talud y bordes del muestreo, con escasa presencia de magnetita en las zonas más grisáceas y limitado a los bloques. En las zonas con oxidación, poseen tonalidades cafés-rojizas-naranjas a moradas, con frecuentes pátinas de óxidos de hierro y manganeso, principalmente en las zonas de falla y fracturas.

Las partes inferiores de los taludes norte y sur, se encuentran silicificadas y parece ser más estables, sin embargo, en los bordes y parte superior, la brecha volcánica no presenta esta característica y presenta una matriz muy alterada con tonalidades rojizas y moradas, típicas de una zona afectada por alteración hidrotermal, lo que genera los problemas de caída de concreto, suelo y rocas (Figura 28). En estas partes, donde el talud no está cubierto por concreto, se observó estructuras tipo *pipes* y *stockwork* que posiblemente concuerde con zonas por donde subieron los fluidos hidrotermales generando bandas de afectación en las rocas.

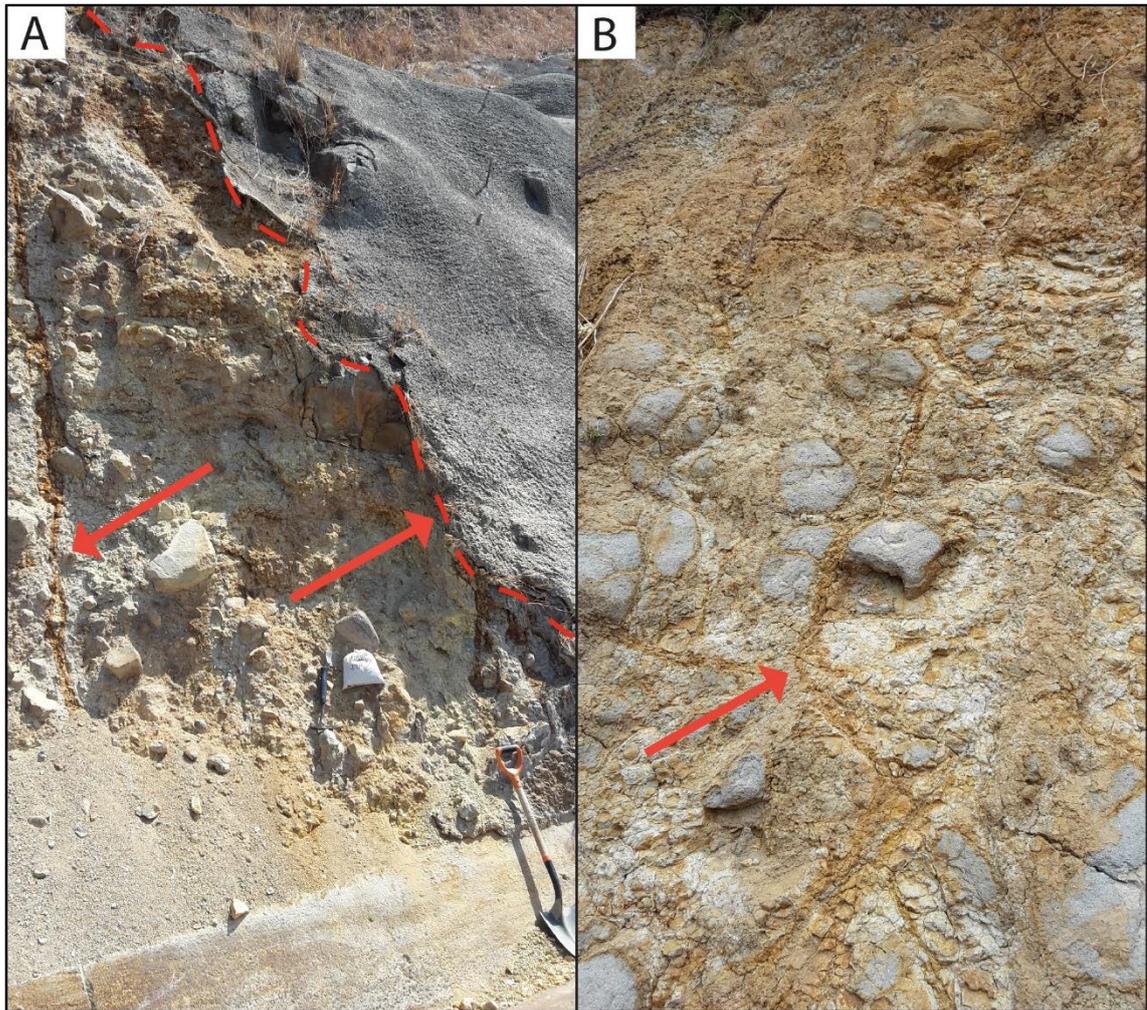


Figura 28. Lado derecho, km 38+600 **A.** Parte inferior. Sectores con silicificación, arcillitización, alteración hidrotermal, pátinas de óxidos de Hierro y Manganeseo. En la parte superior a la derecha de la fotografía, se observan restos del concreto lanzado en mal estado. **B.** Parte superior hacia el Noreste. Se observa amplia meteorización y alteración hidrotermal en hilillos o enrejado tipo “*stockwork* o *pipes*”, que coincide con las fracturas por donde ascendieron los fluidos. Esta zona presenta silicificación en los bloques y en las fracturas.

En este sitio, hay un fuerte olor huevos podridos (H_2S), que proviene de las arcillas de la matriz de la brecha. Hay partes de los taludes (especialmente en los bordes externos y en la parte superior) que tienen rocas afectadas por los procesos normales de

meteorización que se dan en una zona tropical, con diferentes grados de alteración: desde poca hasta la degradación de los minerales originales constituyentes de las rocas.

En la zona central de los taludes –donde se observa la presencia de alteración hidrotermal– las rocas presentan arcillitización y silicificación, se tornan más duras y resistentes a la meteorización y erosión. Sin embargo, está limitada a la parte inferior de los taludes, hasta una altura máxima de 15 m a 19 m. Estas zonas presentan valores de pH bajos. Probablemente, la influencia en la altura la tiene el nivel freático, según la época del año. Se podría esperar que tienda a subir en la época lluviosa.

5.1.3 Mineralogía

Se determinó –mediante observación de campo y laboratorio– que la alteración de los materiales originales en el sitio se presenta en forma de dos tipos de minerales sulfatados que son comunes en zonas donde existe DAR. Estos minerales sulfatados son la jarosita y la schwertmannita; así como cristales de yeso (sulfatos de calcio hidratado), típicos de ambientes ácidos. (Ver figura 29).

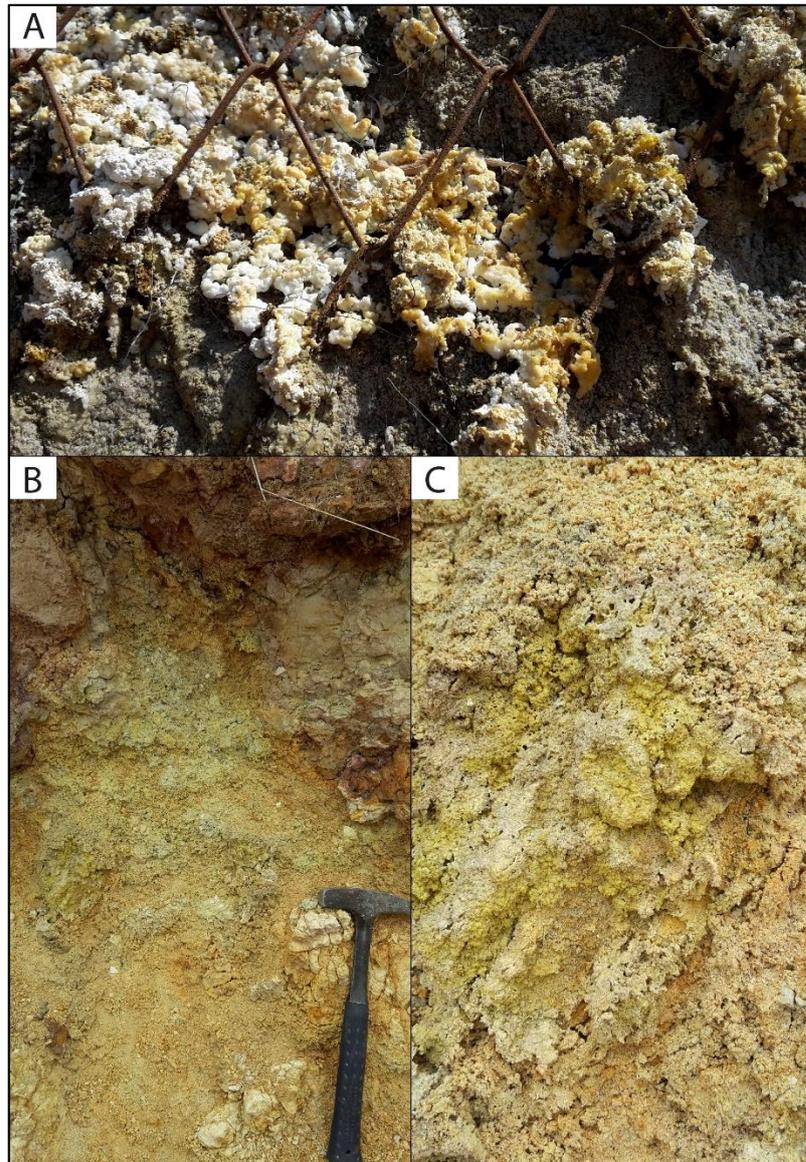


Figura 29. Muestras de minerales de yeso y sulfuros presentes en el talud norte. **A.** Cristales de sulfatos y yeso en las rocas y en la malla metálica de contención. **B.** Obsérvese la acumulación de sulfuros y azufre, piqueta como escala. **C.** Acercamiento en azufre exudado en la roca.

La jarosita, es uno de los minerales que origina “*yellow boy*”, muy común en sitios con DAR. Se trata de un sulfato de potasio de hierro hidratado, que se forma por la oxidación de sulfuros de hierro (Slack 1993; Dold 2009; & Shanks 2012). La

schwertmannita es un hidróxido hidratado de hierro, con aniones adicionales de óxido.

Es un mineral de aparición secundaria que se forma por precipitación en zonas con un pH muy ácido y con alto contenido de iones de sulfato y de hierro. Estas características mineralógicas indican un avance en la evolución del DAR de esta zona. El azufre exudado y diseminado en la roca ocurre principalmente en las zonas de fracturamiento (Slack 1993; Dold 2009; & Shanks 2012).

5.1.4 Mediciones de pH en pasta

Los días 11 de agosto y 15 de abril del 2016 se realizaron las giras de campo para recolectar las muestras en los taludes del km 38+600. Los resultados del muestreo realizado en este sitio provienen de 14 muestras del talud del lado derecho y 15 del talud del lado izquierdo. Fueron analizadas en el Laboratorio de Geoquímica de la Escuela de Geología de la Universidad de Costa Rica con la metodología descrita en la sección 3.8. Los resultados obtenidos se resumen en el cuadro 3 y se muestran en las figuras 30 y 31. El cuadro con los resultados por muestra de este talud, se presenta en los anexos.

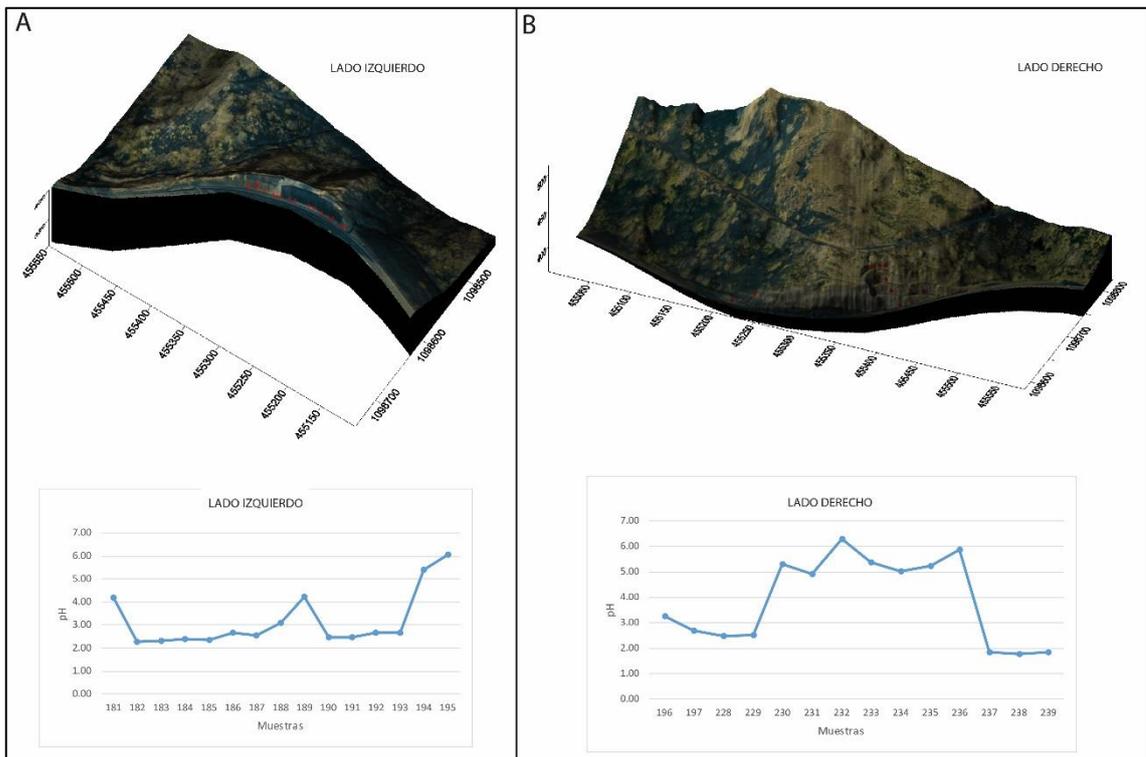


Figura 30. Valores de pH en el lado derecho (derecha) y lado izquierdo (izquierda) del estacionamiento en el kilómetro 38+600. Se observa una concordancia en los datos, mostrando una predominancia en las zonas de afectación sectorizadas en la parte inferior del talud. Conforme se sube en altura sobre el talud, aumenta el valor de pH.

De las 29 muestras analizadas en este sitio, 18 presentan valores de pH inferiores a 3,5, mientras que el resto tienen un pH entre 4,0 y 6,0. La muestra con mayor acidez, tiene un valor bajo de pH de 1,76. Estos resultados demuestran una evidencia cuantitativa de que los materiales rocosos y arcillosos generan drenaje ácido de roca.

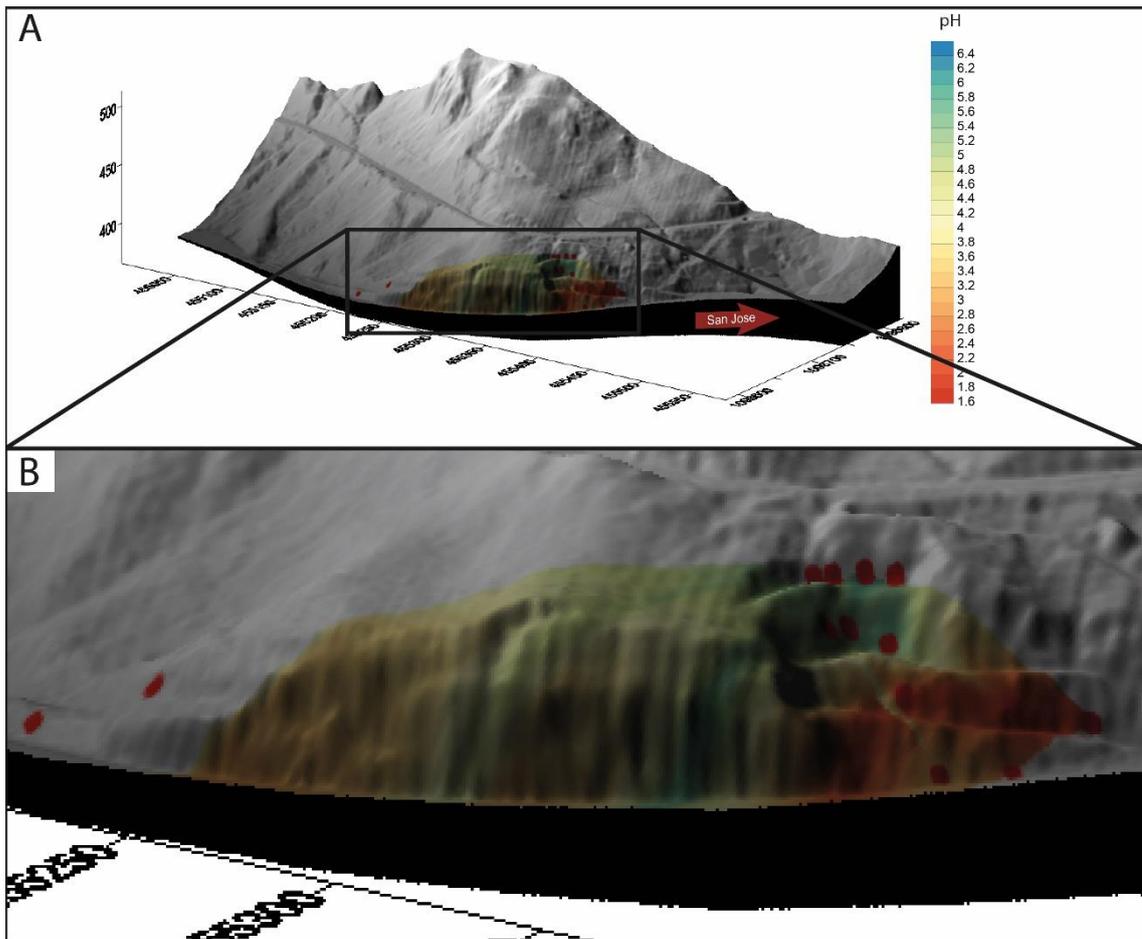


Figura 31. A Interpolación por triangulación lineal del lado derecho (LD), km 38+600. Las zonas con pH más bajo coinciden con las partes inferiores del talud por debajo de los 15 m de altura sobre el nivel de la carretera, zonas con amplia arcillitización y silicificación. Las pendientes del talud y el concreto lanzado o lo que queda de él, induce a la sectorización de la recolección de muestras para la determinación de pH. **B.** Acercamiento de la Interpolación Lineal del muestreo del LD.

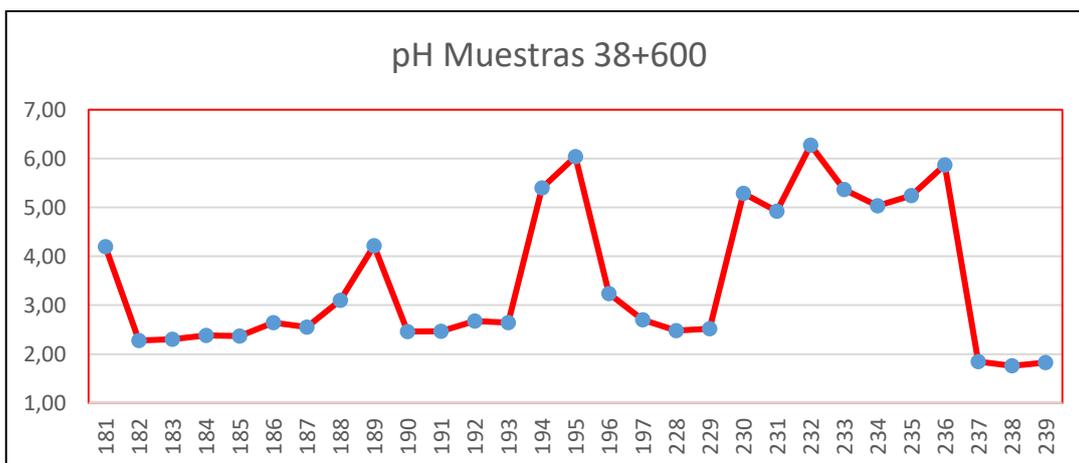


Figura 32. Valores de pH en pasta para el total de muestras analizadas en el estacionamiento del km 38+600. Lo valores con pH superiores a 4,0 corresponden a los bordes y a las partes superiores de los taludes LD y LI.

Cuadro 3. Resultados de la determinación del pH en pasta en muestras de suelos y rocas tomadas en los taludes del estacionamiento en el km 38+600 de la Ruta Nacional N° 27.

Número de muestras analizadas	29
Temperatura promedio del agua durante mediciones (°C)	26,7
Mineralogía presente	Sulfatos (<i>yellow boy</i>) y Sulfuros
	Cristales de Yeso
	Pátinas de FeO y MnO
	Azufre pastoso y exudado en arcillas
Valor promedio de pH	3,52
Valor mínimo de pH	1,76
Valor máximo de pH	6,28

5.2 Estacionamiento del km 45+000

El km 45+600 corresponde con una sección de corte en cajón, con taludes de corte sub-vertical a ambos de la carretera. Ver figuras 33, 34 y 35.

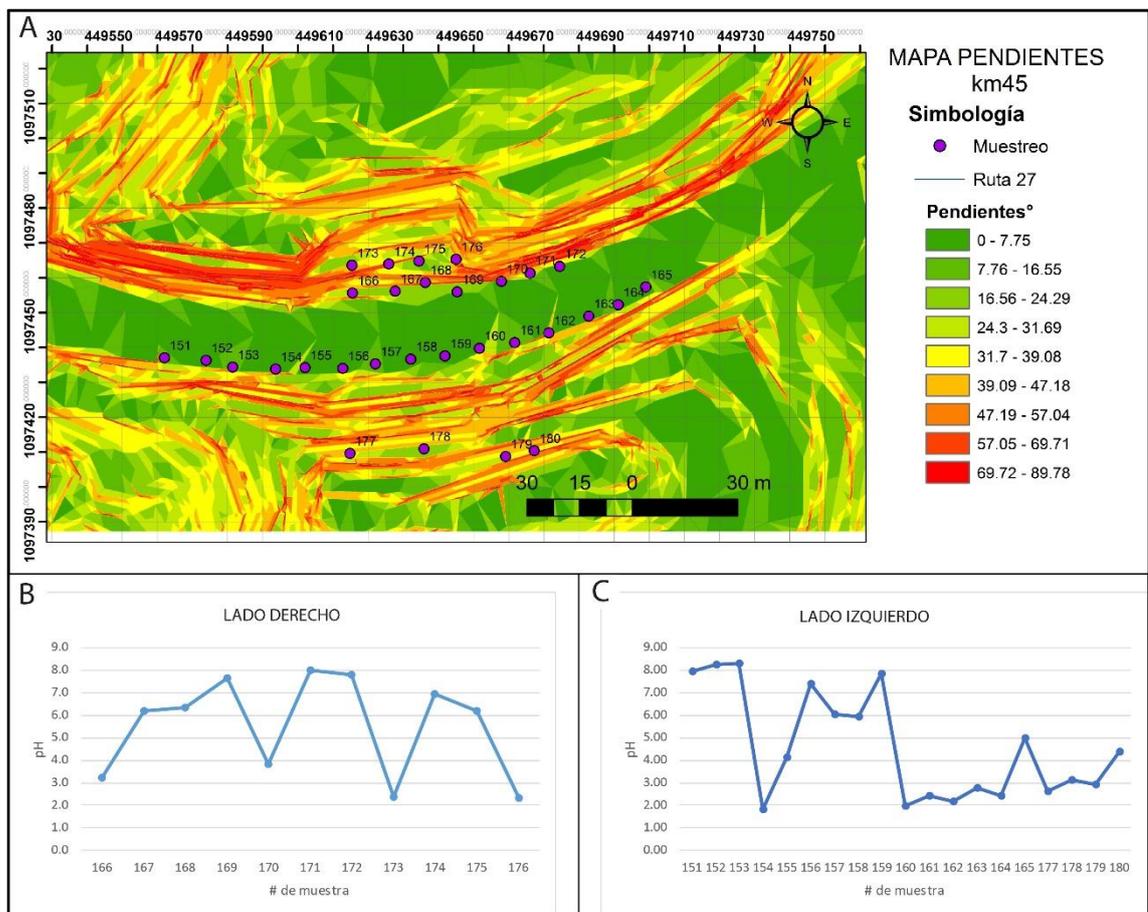


Figura 33. A. Mapa de pendientes en el estacionamiento del kilómetro 45+000. Se muestran las zonas elegidas para obtener muestras para la determinación de pH en pasta y los resultados de las muestras por talud. **B.** Determinaciones de pH, LD. **C.** Determinaciones de pH, LI.

5.2.1 Morfología

El lado derecho tiene una altura máxima de 40 m. Presenta una sección de aproximadamente 12 m de longitud y 22 m de altura con concreto lanzado y otra sección de 75 m sin protección superficial, con tres bermas sub-verticales diferenciadas. Ver figura 34.

Las pendientes de las zonas que están cubiertas con concreto lanzado oscilan entre 60° y 90° (ver figura 34). En el sector de las bermas, las pendientes son cercanas a los 70°. Por la dirección de las pendientes, es muy probable que las líneas de flujo del agua dentro del macizo tengan dirección de norte a sur, por lo tanto, los fluidos buscan salida en el frente del talud.

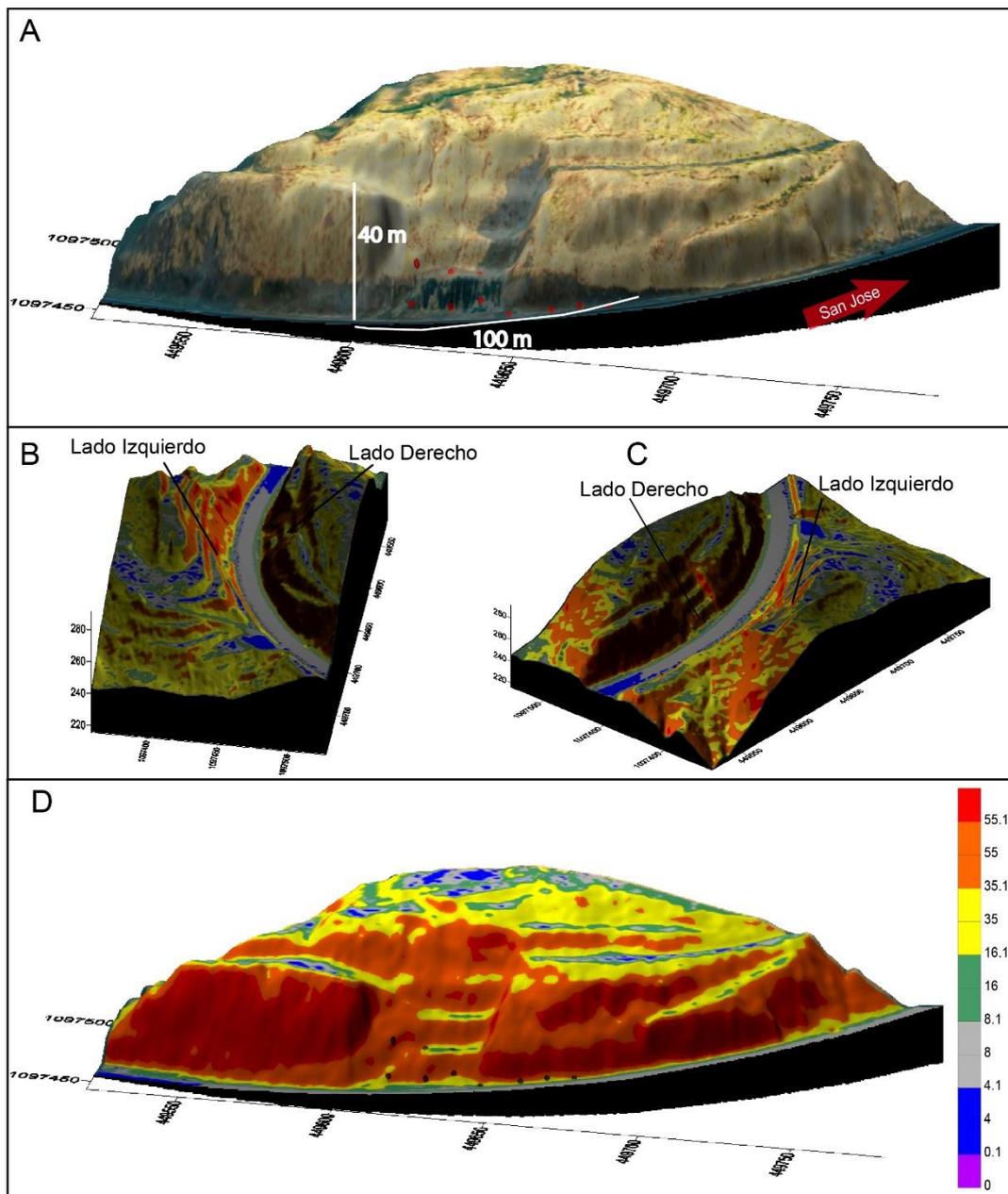


Figura 34. Modelo tridimensional del lado derecho del estacionamiento en el km 45+600, generado a partir de datos Lidar de vuelo tripulado LanammeUCR. **A.** Altura máxima, sitios de muestreo en rojo. **B.** Vista oblicua superior del talud LI, vista hacia al oeste. **C.** Vista oblicua superior del talud LD, viendo hacia el este. **D.** Pendientes en grados LD, con puntos de muestreo en negro.

El lado izquierdo, presenta una longitud de aproximadamente 150 m y una altura

máxima de 50 m. Tiene 2 bermas sub-verticales bien diferenciadas. Las pendientes en toda la sección son superiores a 35° y en algunos puntos puede llegar a ser superiores a 60°.

La parte inferior y media de este talud hacia el oeste, tiene una malla electrosoldada con anclajes de acero y pernos para contención.

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

En el estacionamiento del km 45+000 en general, las aguas fluyen hacia el oeste en dirección de la quebrada Concepción, que es el afluente secundario, el que a su vez fluye hacia el sur, en dirección hacia río Grande de Tárcoles que es el afluente primario.

La mayor parte de estos taludes está expuesta a la intemperie. Hay un sector de ambos taludes con concreto lanzado en la parte oeste del estacionamiento, pero que recubren solamente un 15 % de la totalidad del área expuesta de los taludes. Ver figura 36.

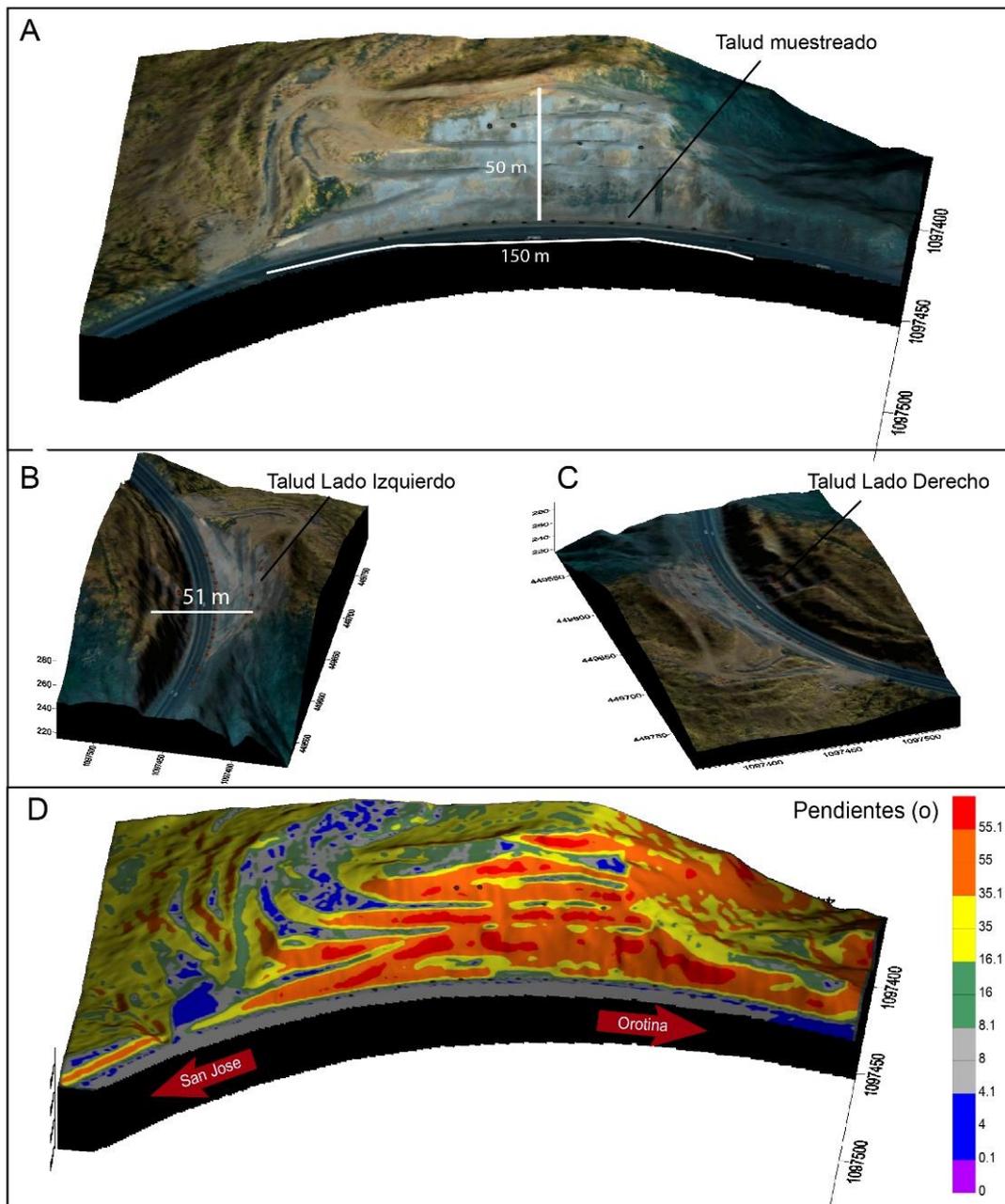


Figura 35. Modelo tridimensional del lado izquierdo del estacionamiento en el km 45+000, generado a partir de datos Lidar obtenidos mediante vehículo tripulado LanammeUCR. **A.** Altura máxima, sitios de muestreo en negro. **B.** Vista oblicua superior, distancia entre taludes, vista al este. **C.** Vista oblicua superior viendo al oeste. **D** Pendientes en grados LI.

5.2.2 Geología

En este estacionamiento aflora lavas andesíticas de la Formación Grifo Alto de edad Plioceno. Posen una matriz predominantemente arcillosa, aunque ocasionalmente se observa silicificación junto las facturas principales. Se observó que las rocas están ampliamente alteradas por alteración hidrotermal.

Se observó que había azufre y pirita diseminados en la matriz. Es frecuente la presencia de sulfatos. Se observaron hilillos y vetillas de calcita < 2 cm, con fuerte reacción al HCl, las cuales generan una disminución en la acidez en los sitios en los que se les observa, principalmente en algunos planos de fragilidad. Es común observar texturas brechosas en las cercanías de las zonas de falla y fracturación.

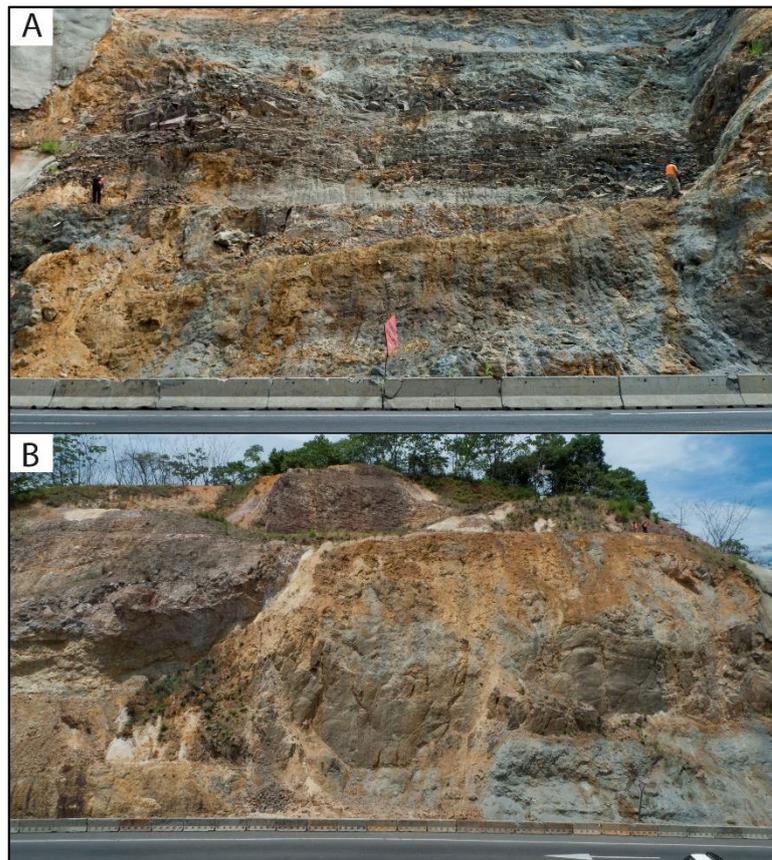


Figura 36. Ejemplo de lavas andesíticas de la formación Grifo Alto en el estacionamiento

del km 45+000. Se observa la morfología de corte en cajón. Hay barreras de protección a la altura de la carretera como una medida de contención por la posible caída de rocas. **A.** Lado derecho, zona de muestreo descubierto de concreto, se observan tres bermas. **B.** Lado izquierdo, con dos terrazas en la parte superior.

Las rocas tienen coloraciones grisáceas-verduzcas a beige-blancuzcas cuando están sanas, principalmente hacia el centro del talud. Estas zonas contienen magnetita.

Las zonas con oxidación, poseen tonalidades cafés-rojizas-naranjas hasta moradas, con frecuentes pátinas de óxidos de hierro y manganeso, principalmente en las zonas de falla y fracturas, lo que genera los problemas de caída de concreto (en el talud norte) suelo y rocas. Esto se debe probablemente a que hay dos zonas de alteración y fracturamiento principal en los bordes del área muestreada, que coincide con las fallas medidas y descritas en la sección 4.3.1. Hay azufre exudado en rocas alteradas, da una coloración grisácea-amarillenta.

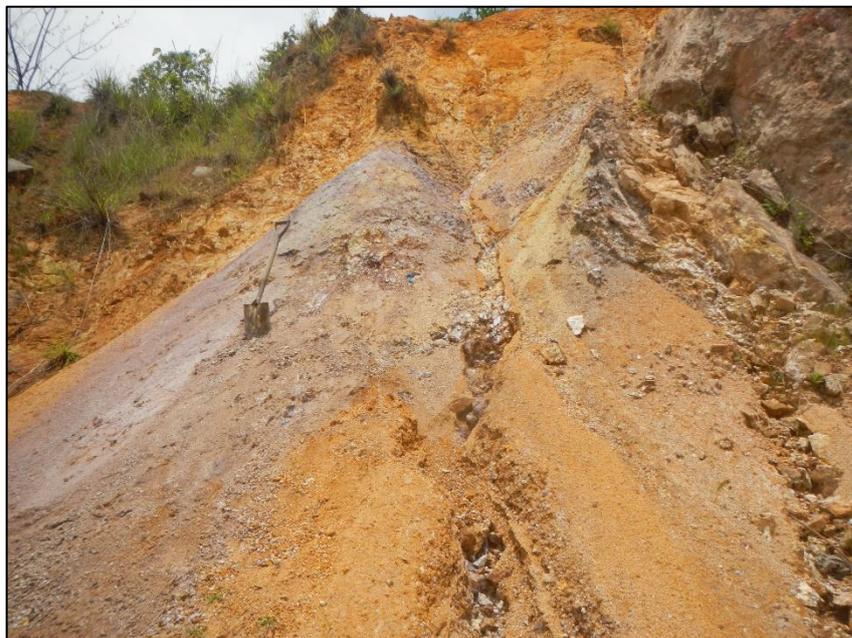


Figura 37. Parte superior del talud, LI. Se observa arcillitización de la tonalidad *beige-caffé-naranja-morada*, óxidos de hierro y arcillas. Zona de amplia alteración.

En el sitio, hay un fuerte olor a azufre y ácido sulfúrico, que proviene de las arcillas de la matriz de las lavas. Se observa pirita entre un 10% y un 20%, las plagioclasas están arcillitizadas e hinchadas.

Hay partes de los taludes (especialmente en el centro) con rocas afectadas por los procesos normales de meteorización en una zona tropical, con diferentes grados de alteración, que va desde poca, hasta la degradación casi completa de los minerales originales constituyentes de las rocas.

5.2.3 Mineralogía

Se determinó mediante observación de campo y laboratorio, que la alteración de los materiales originales en el sitio se presenta en forma de jarosita y schwertmannita típicos de ambientes ácidos, comunes en zonas donde existe DAR. Estas características mineralógicas indican un avance en la evolución del DAR de la zona.

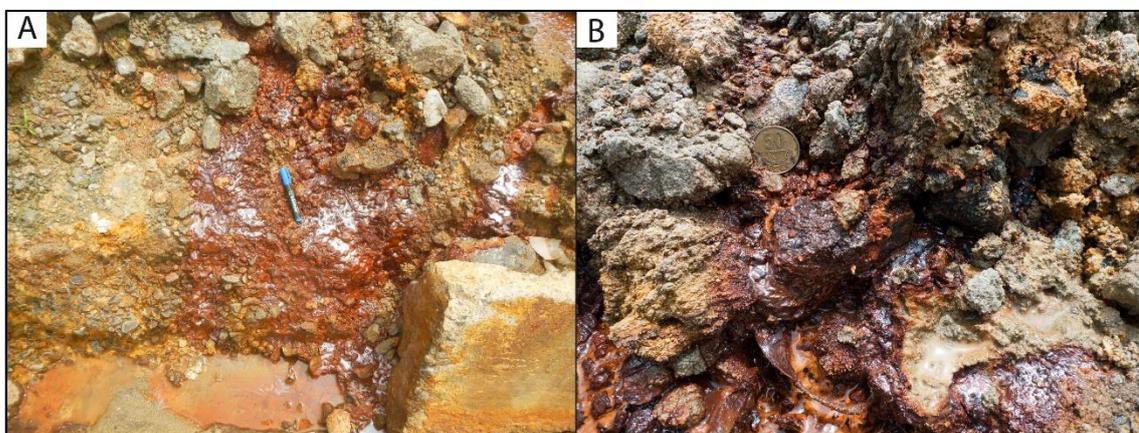


Figura 38. Ejemplos de lavas andesíticas de la formación Grifo Alto, en el talud LD en el estacionamiento del km 45+000. Se observa la aparición de “*yellow boy*”, por precipitación de sulfatos, indicando un estado avanzado de DAR.

Además de los minerales del grupo de los sulfatos, también se observó pirita en

alrededor de un 20 a un 40% de la totalidad de la roca y arcilla. En menor grado se observaron vetillas de calcita milimétricas a 2 cm.

5.2.4 Mediciones de pH en pasta

Los resultados de las mediciones hechas a las muestras provenientes de este sitio, estas muestras son 11 del talud LD y 19 del talud LI. Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Geoquímica de la Escuela de Geología de la Universidad de Costa Rica con la metodología descrita en la sección 3.8. Los resultados obtenidos se resumen en el cuadro 4 y se muestran en la figura 39. El cuadro con los resultados por muestra de este talud se presenta en los anexos.

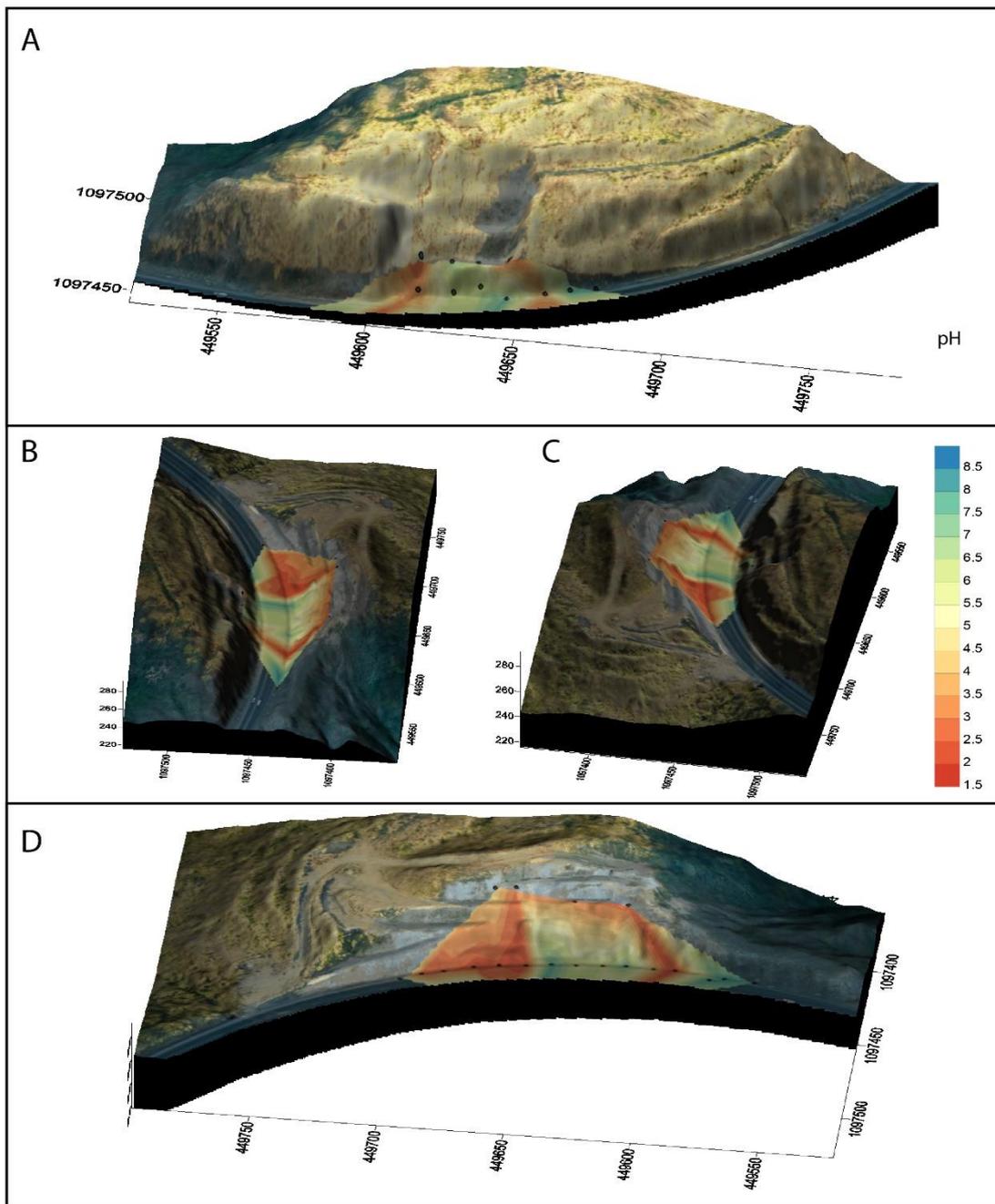


Figura 39. Modelos tridimensionales con interpolación por triangulación lineal del estacionamiento en el km 45+000, generado a partir de datos Lidar obtenidos mediante vehículo tripulado LanammeUCR. **A.** Talud LD, los sitios de muestreo se representan como puntos negros. **B** Vista oblicua superior, vista al este. **C** Vista oblicua superior vista al oeste. **D** Talud LI. Los sitios de muestreo se representan como puntos negros.

De las 30 muestras analizadas en este sitio, 13 presentan valores de pH inferiores a 4,0, mientras que el resto tienen un pH entre 4,2 y 8,3. La muestra con mayor acidez, tiene un valor extremadamente bajo de pH de 1,82. Estos resultados demuestran una evidencia cuantitativa de que los materiales rocosos y arcillosos están generando drenaje ácido de roca.

A diferencia del talud del km 38+600, se observó valores bajos de pH en las partes superiores de los taludes, y gran parte de las rocas presentan amplia alteración hidrotermal arcillitización, silicificación y DAR. Esto se debe posiblemente a que en este afloramiento los fluidos han sido extendidos en las fallas y fracturamiento principal hacia los bordes de los taludes, tal como se observa en la figura 40 con las interpolaciones por triangulación lineal. Ver cuadro 2 en sección 4.3.1.

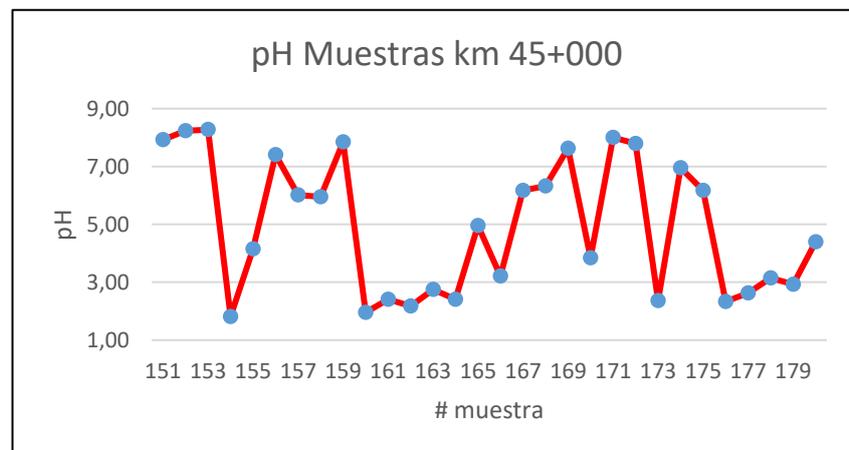


Figura 40. Valores de pH en pasta para el total de muestras analizadas en el estacionamiento del km 45+000.

Cuadro 4. Resultados de muestras analizadas en los taludes del estacionamiento en el km 45+000 de la ruta nacional No. 27

Número de muestras analizadas	30
Temperatura promedio del agua durante mediciones (°C)	26,4
Mineralogía presente	<i>Yellow boy</i> , Sulfuros
	Pátinas de FeO y MnO
	Azufre pastoso en arcillas
Valor promedio de pH	4,94
Valor mínimo de pH	1,82
Valor máximo de pH	8,23

En el laboratorio, durante la determinación de pH, en la muestra #154 correspondiente al oeste del LI (talud sur) y con uno de los pH más bajos de este estudio, se logró identificar un coloide que por la acidez donde se encontró (pH = 1,84) podría coincidir con las características de la bacteria *Thiobacillus ferroxidans* que oxida el hierro a pH < 3,5.

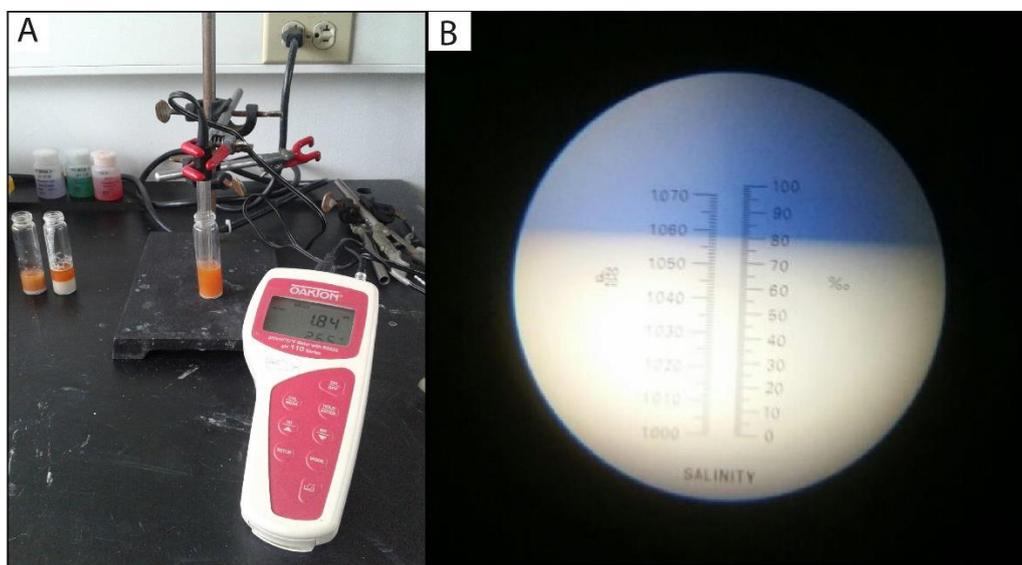


Figura 41. Muestra #154 talud sur km 45+000. **A.** En el recipiente se encuentra la bacteria *Thiobacillus ferroxidans*, obtenida del fluido supernatante de la muestra analizada en el

Laboratorio de Geoquímica de la Escuela Centroamericana de Geología. Se obtuvo resultados de pH= 1,84, **B.** Salinidad superior al 80 %.

5.3 Estacionamiento del km 47+000

Este sitio corresponde con una sección de corte en cajón, con taludes de corte subvertical a ambos de la carretera. Ver figuras 42, 43, 44.

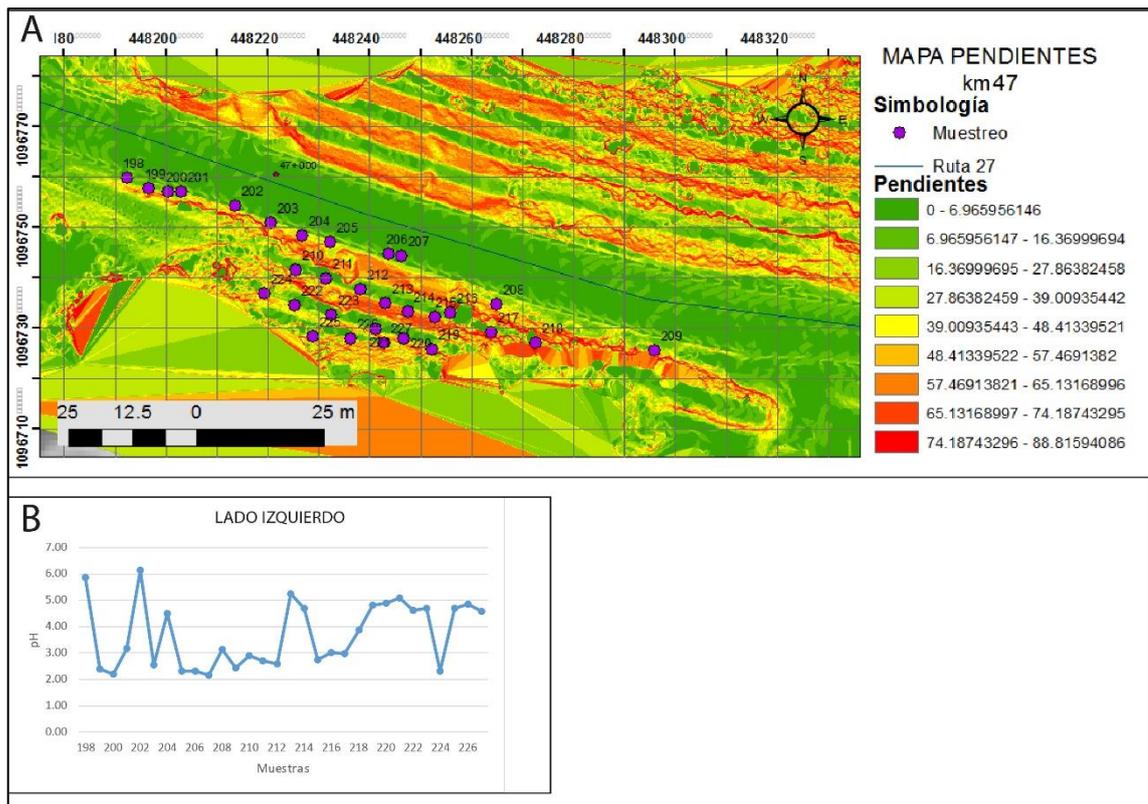


Figura 42. Mapa de pendientes en el estacionamiento del kilómetro 47+000. Se muestran las zonas elegidas para obtener muestras para la determinación de pH en pasta y sus resultados.

5.3.1 Morfología

El talud en el lado izquierdo LI, presenta una longitud de aproximadamente 145 m y una altura máxima de 15 m y se encuentra expuesto a la intemperie. Tiene tres bermas, con cunetas parcialmente colapsadas y una contra cuneta en el sector oeste. Las pendientes en toda la sección son superiores a 35° y en algunos puntos puede llegar a ser superior a 70°. Ver figura 43.

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

En general, las aguas en este estacionamiento fluyen al oeste en dirección al afluente secundario de la quebrada Concepción, la que a su vez fluye hacia el sur en dirección al afluente principal el río Grande de Tárcoles.

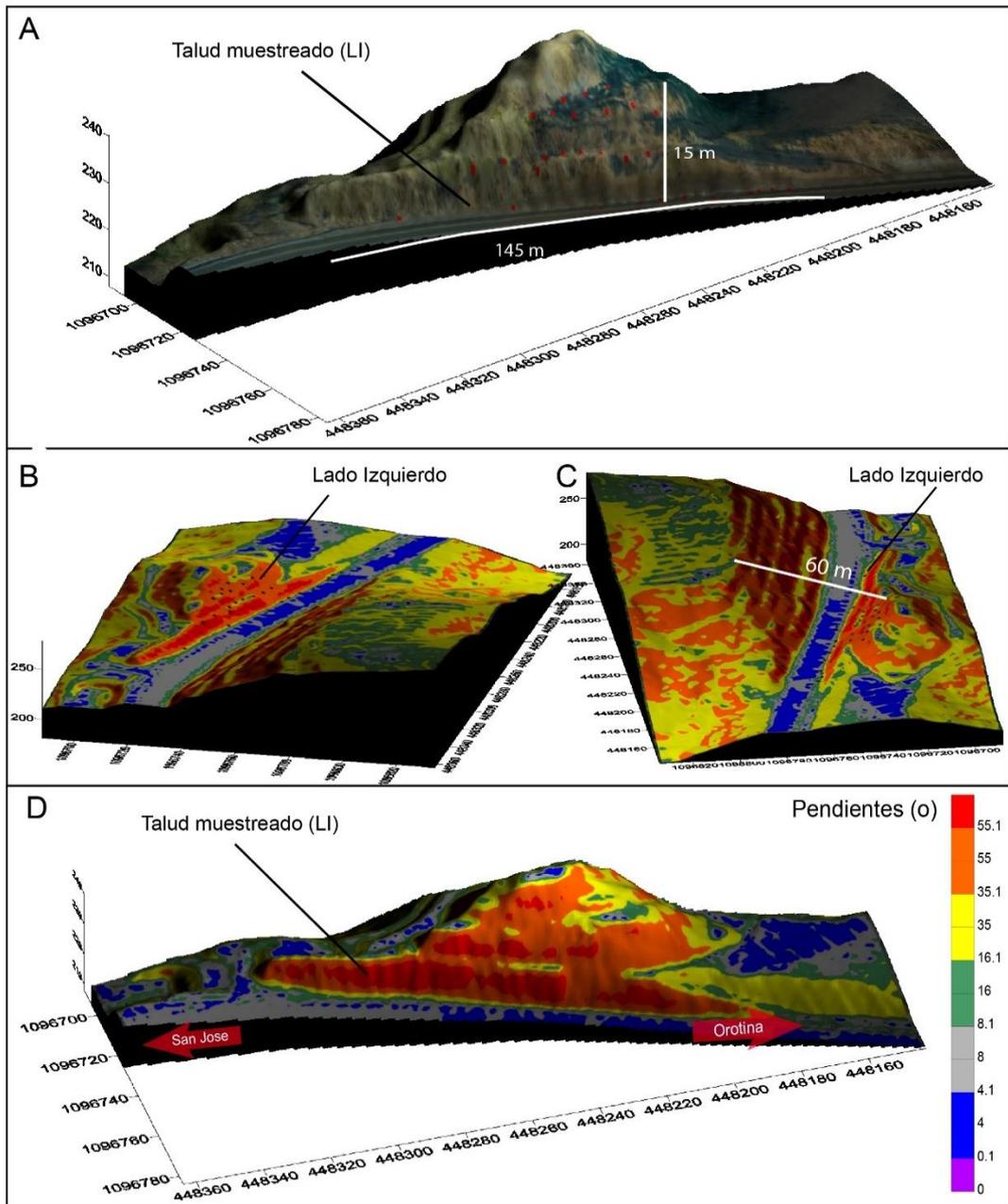


Figura 43. Modelo tridimensional del LI del estacionamiento en el km 47+000, generado a partir de datos Lidar obtenidos mediante vehículo tripulado LanammeUCR. **A.** Altura máxima, sitios de muestreo en rojo. **B** Vista oblicua superior viendo al oeste **C.** Vista oblicua superior viendo al este, distancia entre puntos más altos de taludes. **D.** Pendientes en grados del talud LI.

El talud LD tiene una altura máxima de 32 m. Presenta una sección de aproximadamente 75 m de longitud. Se observaron tres bermas sub-verticales, cubiertas por concreto lanzado. Este talud tiene una pendiente muy alta (70°) sin acceso, por lo que no fue muestreado. Este talud contaba con un muro anclado y drenajes incrustados en la roca meteorizada para dar soporte contra deslizamientos y generar estabilización.

Las pendientes de las zonas que están cubiertas con concreto lanzado oscilan entre 50° y 70°. Es muy probable que las líneas de flujo del agua dentro del macizo tengan dirección de norte a sur, por lo tanto, los fluidos tratan de buscar salida en el frente del talud cubierto por el concreto lanzado, lo que genera carga hidrostática.

5.3.2 Geología

Las lavas andesíticas de la formación Grifo Alto tienen coloraciones grisáceas-verduzcas a beige-blancuzcas cuando están sanas, principalmente hacia la cima del talud y borde oeste del muestreo, con presencia de magnetita, limitado a las rocas menos afectadas por alteración hidrotermal. Se observó vetillas milimétricas a centimétricas de calcita. En donde ocurren estas vetillas, hay una subida del pH de las muestras analizadas, acercándolas un poco hacia a la neutralidad (pH = 6,2 en el mejor caso).

En las zonas con oxidación, poseen tonalidades café-rojizas-naranjas a moradas, con frecuentes pátinas de óxidos de hierro y manganeso, principalmente en las zonas de falla y fracturas. En general las rocas están muy alteradas y prácticamente están convertidas en arcilla.

La parte inferior del talud, presenta una matriz muy alterada con tonalidades blancuzcas, rojizas y moradas, típicas de una zona afectada por alteración hidrotermal, lo

que genera los problemas de fracturamiento del concreto (cunetas), silicificación al lado de las fracturas y arcillitización generalizada. En estas partes, se observó hilillos de sílice y estructuras tipo *stockwork* con óxidos de hierro y sulfatos que concuerda con zonas por donde subieron los fluidos hidrotermales generando bandas de afectación en las rocas.



Figura 44. Sectores con silicificación, arcillitización, alteración hidrotermal, sulfatos y pátinas de óxidos de hierro, manganeso y DAR.

En el sitio, hay un fuerte olor de hidrogeno o ácido sulfhídrico, que proviene de la degradación de las rocas a arcillas. Hay partes de los taludes (especialmente en los bordes externos y parte superior) con rocas afectadas por los procesos normales de meteorización en una zona tropical, con diferentes grados de alteración, que va desde poca, hasta la degradación casi completa de los minerales originales constituyentes de las rocas.

En la zona central donde se observa la presencia de alteración hidrotermal, las rocas presentan arcillitización y silicificación, tornándose duras y resistentes en los sectores silicificados de las fracturas principales, mientras que los alrededores son degradados. Estas zonas presentan valores de pH bajos $< 3,2$.

5.3.3 Mineralogía

Al igual que en los taludes anteriores, se determinó mediante observación de campo y laboratorio, que hay abundancia de sulfuros. Se identificó pirita 5% - 20 % y ¿Marcasita? Posiblemente por la acidez y la amplia alteración. La alteración de los materiales originales en el sitio se presenta en forma de jarosita y schwertmannita; así como cristales de Yeso (sulfatos de calcio hidratado), típicos de ambientes ácidos y zonas donde existe DAR avanzado. Ver figura 45 B.

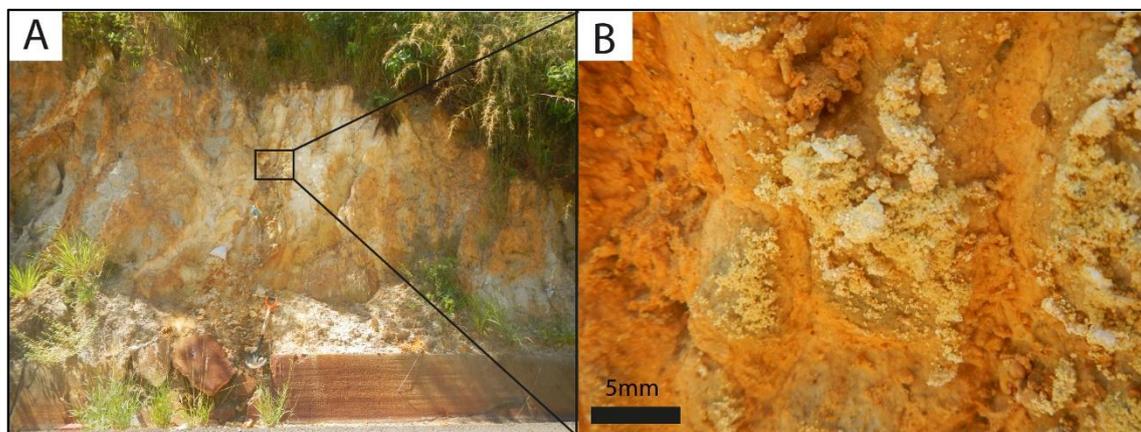


Figura 45. Ejemplos de sulfatos y sulfuros presentes en el talud sur. **A.** Rocas alteradas con presencia de cristales de pirita, sulfatos y yeso. Pala como escala del afloramiento. Provocan el colapso de la cuneta la cual está oxidada y con pérdida del componente calcáreo. **B.** Acercamiento. Obsérvese la acumulación de estos minerales en las fracturas.

La jarosita, sulfato de potasio de hierro hidratado se forma por la oxidación de sulfuros de hierro. La schwertmannita, hidróxido hidratado de hierro, con aniones adicionales de óxido. Es un mineral de aparición secundaria que se forma por precipitación en zonas con pH muy ácido y alto contenido en iones de sulfato de hierro. Estas características mineralógicas indican un avance en la evolución del DAR de esta zona. También se observó azufre exudado y diseminado en la roca. Este ocurre principalmente en zonas de fracturamiento.

5.3.4 Mediciones de pH en pasta

El 02 de diciembre del 2015 se realizó la gira de campo para recolectar las muestras en este estacionamiento. Los resultados del muestreo realizado en este sitio provienen de 30 muestras del LI. Todas fueron analizadas en el Laboratorio de Geoquímica de la Escuela de Geología de la Universidad de Costa Rica con la metodología descrita en la sección 3.8. Los resultados obtenidos se resumen en el cuadro 3 y se muestran en la figura 46. El cuadro con todos los resultados por muestra de este talud, se presenta en los anexos.

De las 30 muestras analizadas con la metodología de pH en pasta en este sitio, 16 presentan valores inferiores a 3,2, mientras que el resto tienen un pH entre 3,9 y 6,1. La muestra con mayor acidez, tiene un valor de pH de 2,2. Estos resultados demuestran una evidencia cuantitativa de que los materiales rocosos y arcillosos están generando drenaje ácido de roca.

Se observó que en este talud hay una predominancia de pH bajo en la parte inferior, así como en la parte superior hacia el oeste. Esto se debe al fracturamiento que posee el sitio y está ligado a las zonas de falla medidas. Ver cuadro 2 en la sección 4.3.1.

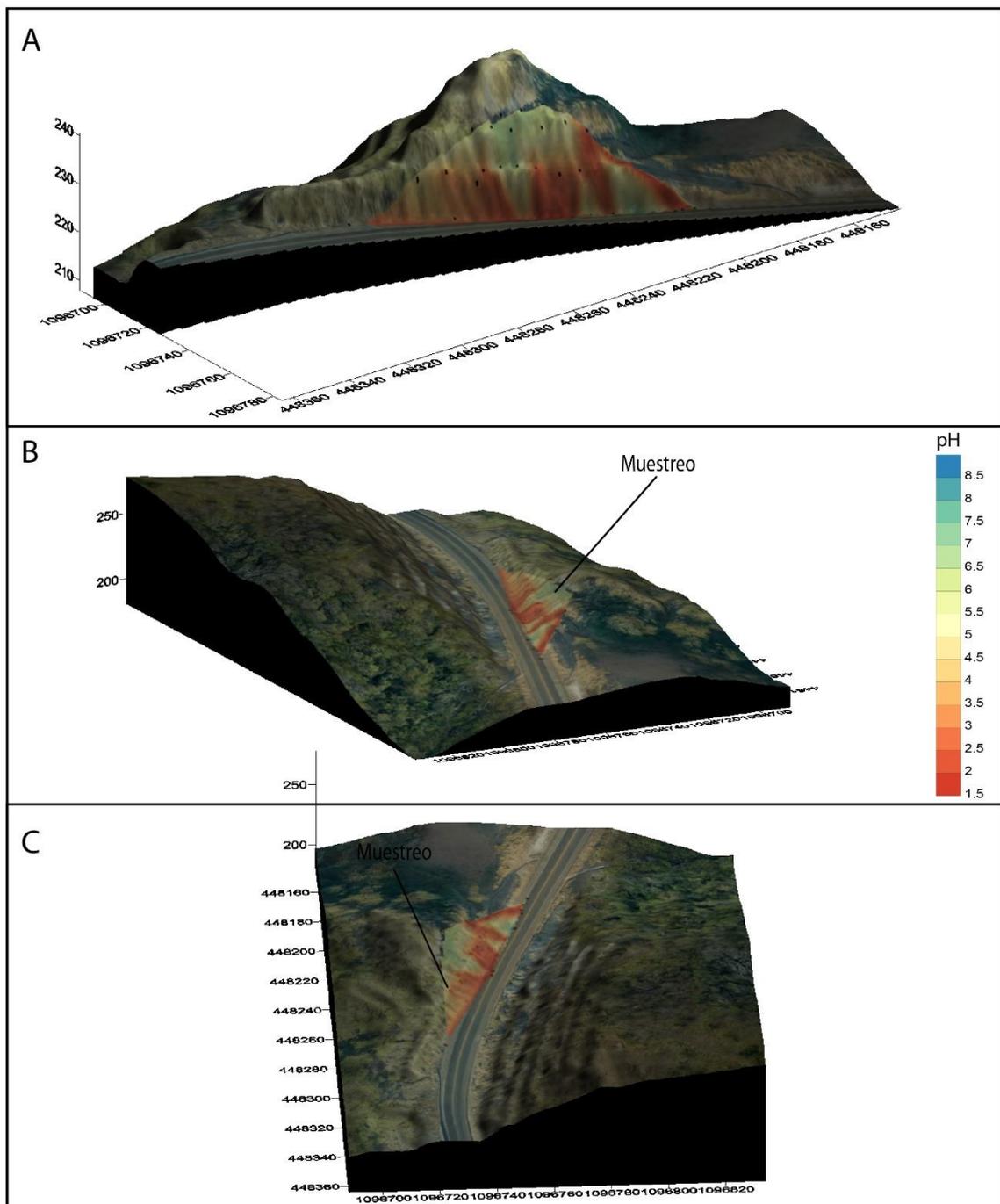


Figura 46. Modelos tridimensionales con interpolación por triangulación lineal del estacionamiento en el km 47+000, generado a partir de datos Lidar obtenidos mediante vehículo tripulado LanammeUCR. Lado izquierdo **A.** LI, los sitios de muestreo se representan como puntos negros. **B** Vista oblicua superior, viendo al este. **C** Vista oblicua superior viendo al oeste.

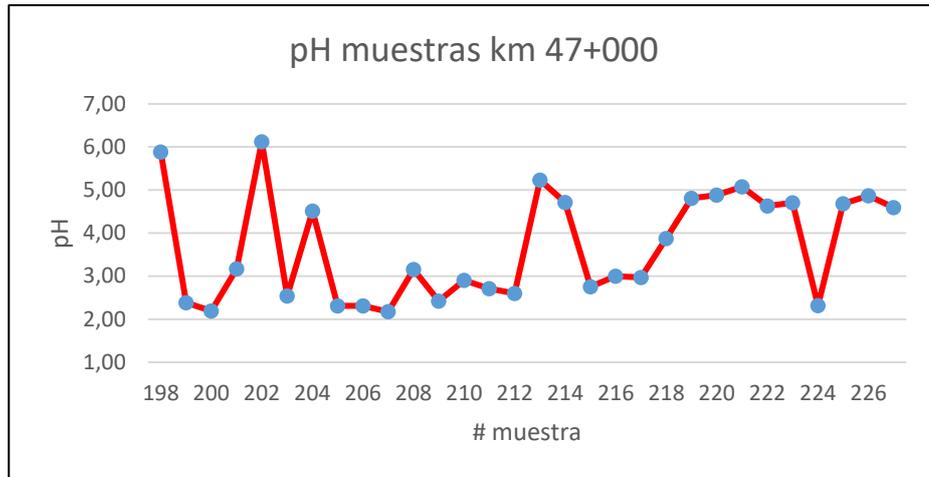


Figura 47. Valores de pH en pasta para el total de muestras analizadas en el estacionamiento del km 47+000.

Cuadro 5. Resultados de muestras analizadas en los taludes del estacionamiento en el km 47+000 de la ruta nacional No. 27

Número de muestras analizadas	30
Temperatura promedio del agua durante mediciones (°C)	25,7
Mineralogía presente	Sulfatos (<i>yellow boy</i>) y pirita
	Cristales de Yeso
	Pátinas de FeO y MnO
	Azufre botroidal, pastoso y exudado en arcillas
Valor promedio de pH	3,68
Valor mínimo de pH	2,17
Valor máximo de pH	6,12

A continuación, se presenta un resumen del total de datos obtenidos en el laboratorio. Ver figura 48 y cuadro 6.

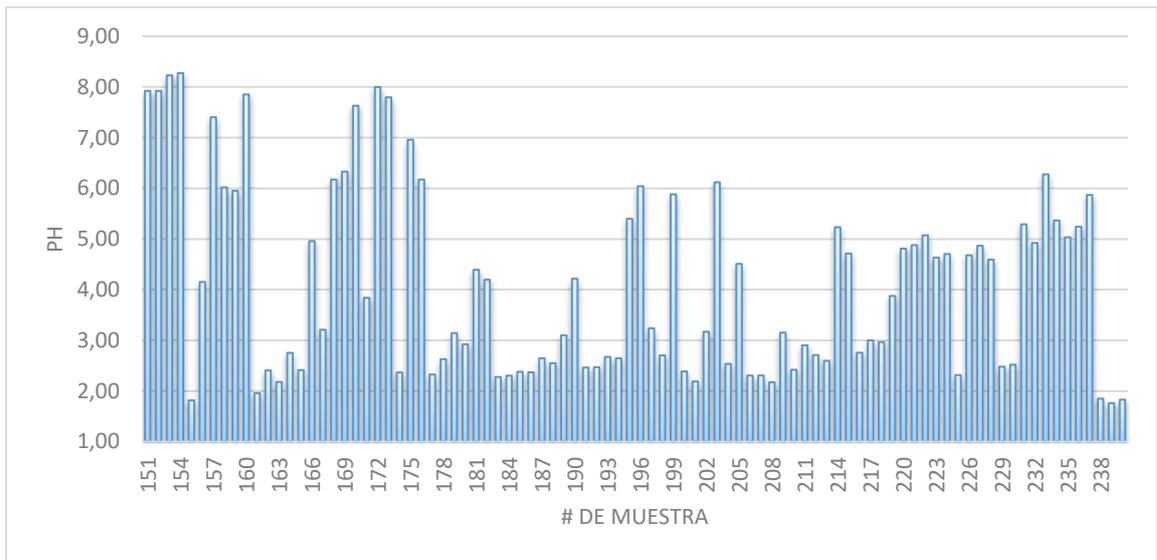


Figura 48. Datos de pH en pasta de los taludes: 38+600, 45+000 y 47+000; recopilado en este trabajo.

Cuadro 6. Resumen de resultados de muestras analizadas con metodología de pH en pasta, para cada afloramiento estudiado en este trabajo. Valores de pH en totalidad de muestras de los tres afloramientos estudiados. El promedio de pH de los tres sitios es de 4,06.

Valor promedio de pH en km 38+600	3,52	Valor promedio de pH en km 45+000	4,94	Valor promedio de pH en km 47+000	3,68
Valor más alto de pH	6,28	Valor más alto de pH	8,27	Valor más alto de pH	6,12
Valor más bajo de pH	1,76	Valor más bajo de pH	1,82	Valor más bajo de pH	2,17
Promedio temperatura del agua de medición	26,68	Promedio temperatura del agua de medición	26,40	Promedio temperatura del agua de medición	25,70

5.4 Afectaciones de las obras de civiles

Como se comprobó en la sección anterior, ocurre drenaje ácido de roca en cada uno de los sitios elegidos para realizar los muestreos y análisis de pH en pasta en este trabajo. El DAR provoca afectaciones en las estructuras de concreto como cunetas, contra cunetas, caños, concreto lanzado; así como en las estructuras metálicas tales como pernos,

anclajes y mallas electrosoldadas, lo que provoca el desprendimiento de todos los anteriores, desde los taludes hacia la carretera, generando un riesgo para los usuarios que transitan la RN-27.

Esto se debe a la interacción química que ocurre entre el DAR y el concreto, produciendo una pérdida del componente calcáreo, por la interacción del ácido sulfúrico producido por los sulfatos y sulfuros presentes en los materiales rocosos y arcillosos de los taludes, con los componentes carbonatados presentes en los agregados pétreos y calcáreos del concreto, incrementando su porosidad e incrementando el ingreso de humedad a la matriz cementante, lo que provoca que el acero que pueda contener estos materiales de concreto entren en contacto directo con DAR generando corrosión y disminución del diámetro y masa del acero y por ende su resistencia. Ver figura 49.

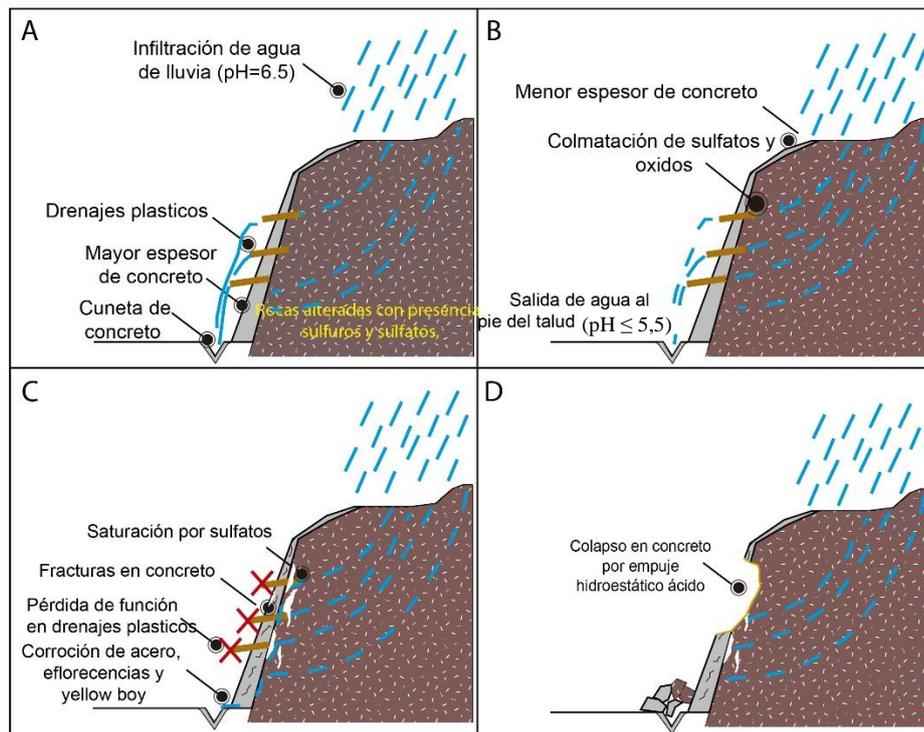


Figura 49. Figura de afectación de taludes. Tomado y modificado de Lanamme (2015)
A. Las rocas alteradas hidrotérmicamente del talud original con presencia de sulfuros y sulfatos fueron expuestas a condiciones de oxidación e interacción con humedad y agua

de lluvia cuando se hicieron los cortes para construir la carretera. Los materiales, fueron cubiertos por concreto lanzado y se colocaron drenajes plásticos para propiciar la salida de agua infiltrada. **B.** Al infiltrarse el agua de lluvia con un pH promedio de 6,5 e interactuar con los sulfuros de las rocas, se generó un aumento en su acidez, posteriormente se generaron sulfatos que lentamente saturaron y provocaron la colmatación de los drenajes, disminuyendo la evacuación del agua ácida infiltrada. **C.** En el concreto degradado, se produjeron grietas que permitieron el ingreso y la salida del agua, así como la pérdida del suelo localizado debajo del concreto. Las nuevas grietas aceleraron el proceso de corrosión en el acero, lo que derivó en pérdida de resistencia y mayor deterioro. **D.** Una vez alcanzada la condición severa de deterioro, generada por el proceso de DAR, el empuje hidrostático ácido provocó la caída del concreto agrietado, junto con suelo y rocas del talud.

Durante el trabajo de campo se observó gran afectación en las estructuras de concreto y acero recubriendo los taludes. Ver figuras 50 y 51. Tanto el concreto lanzado, cunetas, drenajes y demás estructuras de concreto, se ven seriamente afectados, perdiendo el componente calcáreo, y como consecuencia colapsando. Los pernos, mallas electrosoldadas y demás componentes de acero disminuyen sus diámetros normales, perdiendo su dureza y resistencia.

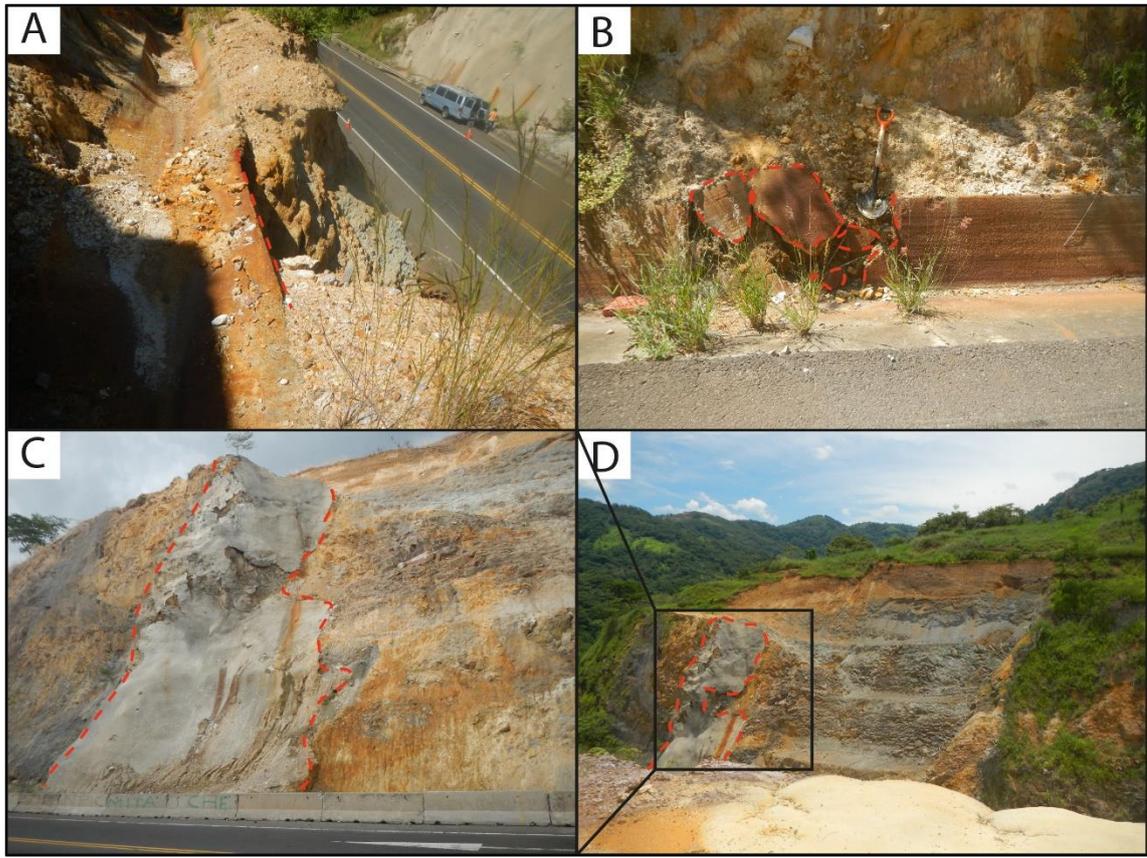


Figura 50. Ejemplos de afectación en concreto en (líneas punteadas rojas): **A.** km 47+000 LD, cuneta en voladizo colapsada, por deslizamiento de material en la parte inferior. Talud a 20 m de altura sobre el nivel de la carretera. **B.** km 47+000, LI cunetas desgastadas, oxidadas y quebradas por efecto directo de DAR, al lado de la carretera. **C** y **D.** km 45+000, concreto lanzado resquebrajado e inexistente en el 80 % del talud LD.

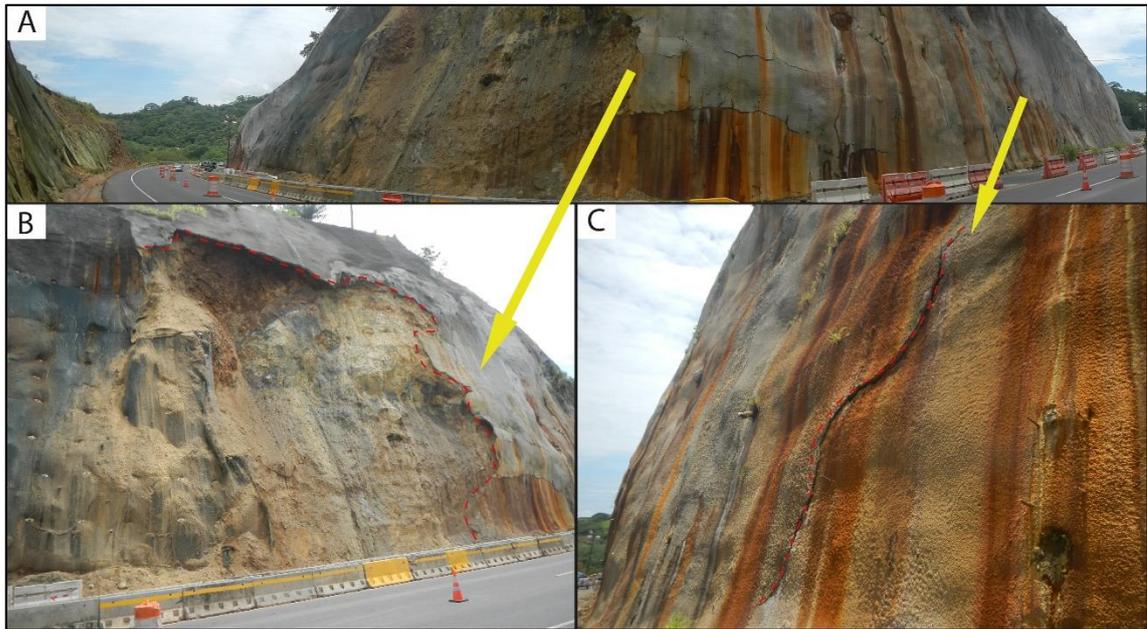


Figura 51. Ejemplo de afectación en km 38+600. **A.** Vista panorámica de la carretera. En dirección hacia la derecha San José, en dirección hacia la izquierda Orotina. **B.** Concreto ausente en el talud sub-vertical del LD. **C.** Acercamiento de las zonas afectadas, LD. Fracturas métricas en concreto lanzado. Se observan tuberías plásticas que actúan parcialmente como drenajes, dentro del talud. En el sitio ocurren deslizamientos frecuentemente, generando peligro para los vehículos que transitan la vía. Los componentes de acero están corroídos y presentan disminución en diámetro y resistencia.

6. Conclusiones y recomendaciones

Se presentan a continuación las conclusiones más relevantes obtenidas a partir de los resultados de este trabajo.

Se realizó un estudio detallado de las unidades litológicas aflorantes en los estacionamientos de los kilómetros: 38+600, 45+000 y 47+000 de la RN-27, los cuales tenían indicios cualitativos de presentar drenaje ácido de roca DAR. Se confirmó cuantitativamente mediante la determinación del pH en pasta de roca y suelo, que, efectivamente, ocurre DAR en los tres sitios de estudio.

La morfología del área de estudio corresponde a una zona tectónica intramontana. Los km 45+000 y 47+000 se ubican en la unidad montañosa prominente, poseen formas agudas y pendientes abruptas lo que junto al tectonismo y alteración hidrotermal, favorece los deslizamientos. El km 38+600 ubicado en la zona de transición entre las unidades montañosas, entre el frente montañoso del Aguacate y el nivel base local del río Grande de Tárcoles, genera geformas de *debris avalanche (hummocky)*.

Las microcuencas de la zona analizada presentan un sistema de drenaje de tipo dendrítico a subparalelo. El agua en de los drenajes fluye hacia el Oeste, Este y suroeste; en dirección a los ríos Salitral y quebrada Concepción, los que a su vez fluyen hacia el Sur, al río Grande de Tárcoles.

Regionalmente, aflora parte de la estratigrafía del extremo occidental del Valle Central y las estribaciones de los Montes del Aguacate. En general comprende tres unidades geológicas: 1. *Formación Grifo Alto*, asociado a coladas de lava y brechas volcánicas, 2. *Unidad de Epiclastos varios*, donde predominan materiales de tipo *debris avalanche*, junto con brechas volcánicas y aluviones interdigitados y 3. *Formación Tiribí*,

que corresponde con ignimbritas con diferentes facies de enfriamiento.

Localmente, en los tres estacionamientos estudiados, las rocas corresponden a la Formación Grifo Alto de edad Plioceno. En los kilómetros 45+000 y 47+000 afloran lavas andesíticas, mientras que en el km 38+600 afloran brechas andesíticas vítreas monomíticas; todas con amplia alteración hidrotermal, fuerte fracturamiento y extensa presencia de sulfuros como pirita y azufre exudado entre 5-20%, sulfatos y ácido sulfúrico.

La tectónica regional del área es compleja. Según Arias & Denyer (1991) el área presenta plegamiento, fallamiento y basculamiento por compresión S-N, desde el cretácico hasta el presente. Las fracturas con rumbo este-oeste originadas por la descompresión S-N, fueron aprovechadas por los fluidos hidrotermales para su ascenso, colaborando con el ascenso de fluidos hidrotermales, que silicificaron las rocas, rellenando parcial o totalmente con cuarzo las fracturas tensionales.

El tipo de fracturamiento, fallamiento y plegamiento de la zona, se podría explicar por un sistema de corrimientos con componente de rumbo sinistral. La falla Tárcoles, falla doble sinistral con extensión de 90 km, representa una falla de desgarre importante, dado que a partir de esta surgen los principales corrimientos de la zona de estudio (Montero, 1999).

Porras et al. (2012), realizan mecanismos focales, lo que indican un sistema de fallas inversas con componente de rumbo. Observaron cuatro zonas de falla cortando las rocas de la Formación Grifo Alto, y corresponden con: la zona de falla Escobal, la zona de falla Balsa, la falla Río Grande y la falla Turrúcares, todas paralelas entre sí con dirección NW-SE. La falla Balsa está asociada a un pliegue con orientación NW-SE. Proponen que las primeras estructuras en formarse en la zona, son los corrimientos Escobal y Balsa, que se encuentran directamente relacionadas con la zona de desgarre

falla Tárcoles, y se encuentran afectadas por los fluidos hidrotermales y cortan los depósitos de Grifo Alto.

Localmente, fue difícil medir estructuras, sin embargo, se caracteriza los tres estacionamientos por su afectación como zonas de falla, las cuales están ligadas a la tectónica regional. Los rumbos predominantes de las estructuras medidas son NW-SE, con buzamientos subverticales, lo que coincide con las zonas de falla Escobal y Balsa. Estas estructuras representan el punto de salida de los fluidos hidrotermales que afectan ampliamente las rocas, y son el punto de génesis del DAR.

Cuando se construyó la carretera se expuso a condiciones de humedad y oxidación las rocas y materiales afectados por alteración hidrotermal, con un alto porcentaje de sulfuros, los que con el tiempo generaron sulfatos, los cuales en presencia del oxígeno y del agua generan DAR. Se observó yeso, *yellow boy*, además de sulfuros como pirita y posiblemente marcasita. Se comprobó presencia de jarosita y schwermannita, sulfatos comunes en zonas de DAR, los que indican un avance evolutivo del DAR.

En algunos casos los afloramientos se cubrieron de masas amarillento-verdosas a blancuzcas a que posiblemente correspondan a Melanterita $\text{Fe}(\text{SO})_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, se forman a partir de aguas sulfatadas muy saturadas en un ambiente enrarecido de oxígeno, donde la marcasita (FeS_2) se suele disgregar con más facilidad que la pirita, con la consecuente formación de sulfatos ferrosos y ácido sulfúrico.

En general, predomina en los tres estacionamientos la degradación del material rocoso y arcilloso, con valor de pH bajo debido a la subida de fluidos hidrotermales por las fracturas y zonas de falla presentes en los sitios de trabajo, principalmente las partes inferiores de los taludes lo que provoca silicificación en las fracturas y amplia arcillitización en los márgenes, y en su etapa más avanzada degradación a suelo. En el

estacionamiento del km 38+600, se observó estructuras tipo *stockwork* indicando el movimiento ascendente y expansivo de los fluidos hidrotermales.

No siempre la silicificación implica que el material no contenga DAR, caso específico de los taludes estudiados en los estacionamientos de los kilómetros 38+600 y 45+000. El DAR está asociado a zonas de falla-fractura, en ambos casos se observó silicificación en las fracturas, y también se observó resultados de pH bajo con valores entre 1 y 4.

Se realizó 313 ensayos en el Laboratorio de Geoquímica de la Escuela Centroamericana de geología, a partir del análisis de 89 muestras de roca y suelo recolectadas en los tres estacionamientos seleccionados. De las 89 muestras recolectadas, 82 tienen pH ácido (menor o igual a 6,3), lo que representa un 92 % de la totalidad de las muestras. Se comprobó la acidez de los tres sitios muestreados con la metodología de pH en pasta, produciendo los siguientes resultados generales: pH más bajo = 1,76; pH más alto = 8,26; pH promedio = 4,1. Esto demuestra cuantitativamente la presencia de DAR en los tres estacionamientos estudiados.

La geometría en cajón creada por el concesionario en los taludes de los estacionamientos en estudio en este trabajo, con pendientes en algunos casos mayores a 55°, generan inestabilidad, pues el agua drena por el frente del talud -por medio de tuberías plásticas puestas desde el interior del talud- y a los lados -a través de cunetas y contra cunetas-, y como se determinó en este estudio en muchos casos las estructuras en concreto fueron dañadas o están ausentes, pues caen al entrar en contacto con aguas ácidas.

A partir de las observaciones realizadas en los distintos puntos donde se trabajó, es claro que el DAR ocasiona deterioro de estructuras metálicas y de concreto. Las

cunetas y contra cunetas construidas para el manejo de aguas superficiales presentan acumulación de óxido de hierro y sulfatos que son depositados por las aguas, posteriormente pierden consistencia debido a la desintegración del material calcáreo al entrar en contacto con aguas ácidas, lo que genera su colapso. El concreto lanzado presenta la misma problemática con el agravante que está colocado en los taludes subverticales y se desprende, pudiendo afectar a los usuarios de la ruta nacional No 27. Las varillas de acero, malla electrosoldada, pernos y anclajes sufren inicialmente oxidación en sus partes externas y con el paso del tiempo se convierte en corrosión, hasta degradar completamente el acero, reduciendo su diámetro original y resistencia.

Recomendaciones

Se recomienda realizar las siguientes acciones:

Identificar todos los taludes de la RN-27 en los que se vaya a mover material con Drenaje Ácido de Rocas, por ejemplo, los identificados en este trabajo, así como otros sitios identificados con alteración hidrotermal, principalmente en la próxima etapa de ampliación de la RN-27, pues la remoción de estos materiales con presencia de sulfuros y sulfatos, agrava y cataliza el DAR.

Es recomendable determinar la profundidad de la zona de afectación por DAR en los sitios presentados en este estudio. Para esto, se sugiere realizar en una etapa inicial estudios geofísicos, con el fin de conocer la profundidad a la que se encuentra la roca sana, y conocer así la posible afectación en profundidad del DAR; al mismo tiempo, es recomendable realizar perforaciones verticales y horizontales en cada una de las bermas de los taludes hasta llegar a la roca sana y a este material recuperado de cada perforación se le deberían de realizar ensayos de pH en pasta.

Instrumentalizar en campo con datalogger los sitios críticos que presentan DAR, para obtener datos espaciales en tiempo real y observar si ocurren cambios en las distintas épocas del año, por ejemplo, ver si hay variaciones de pH en las épocas lluviosa y seca.

Restauración completa de los taludes y que incluya técnicas empleadas para el control de DAR, control de erosión, control de aguas de escorrentía e integración paisajística. Para poder hacer esto, es necesario conocer las condiciones en que se encuentra cada zona afectada para así determinar el sistema adecuado de recuperación. Este trabajo es un aporte para realizar una adecuada restauración de los taludes, basado en el estado de ellos y en las determinaciones que se hicieron del pH en pasta.

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 sulfuros 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 a la carretera, se recomienda fuertemente que se hagan este tipo de análisis. Ruiz (2015)

Otras técnicas utilizadas para la medición y predicción del DAR, son las pruebas de extracción de lixiviado, test cinéticos, estáticos y confirmativos. Mediante la técnica de CARD-FISH se puede determinar microorganismos presentes en las muestras analizadas. Todos los anteriores se deberían realizar para conocer mejor el fenómeno de DAR, así como para toma de decisiones.

Aunque no se realizó estudios de aguas en este trabajo, es conocido que los sulfatos pueden acarrear y generar transporte de metales, lo que genera una degradación del ambiente. Es de gran importancia acotar que este tipo de sulfatos fueron identificados en este estudio. Sería un aporte adicional realizar un estudio de metales en aguas, para conocer lo que estos taludes identificados con DAR le están aportando a los suelos, a las aguas superficiales, al mar y finalmente a la biota.

Al ser la RN-27 una ruta concesionada, la administración debe solicitarle al contratista que se haga cargo de darle mantenimiento real, brindándole protección al usuario. El contratista se limita únicamente a recoger los deslizamientos de material que cae en la carretera. Las condiciones actuales y como se demostró en este estudio desde antes de la creación de la ruta, son de riesgo. Se deben hacer los estudios geológicos adecuados, incluidos análisis para determinar DAR en zonas que se estime que pueda presentar este proceso, de previo a la apertura de una ruta nacional. Por lo que es necesario que el CONAVI y MOPT presten atención a los comentarios hechos en este estudio, con el fin de tengan más eficiencia y eficacia en el diseño y ubicación de las rutas nacionales.

REFERENCIAS

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

ARIAS, O., DENYER, P., 1991: Estructura Geológica de la región Comprendida en las Hojas Topográficas Abra, Carraigres, Candelaria y rio Grande

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.

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

BERUBE, M., LOCAT, J., GELINAS, P., CHAGNON, J., LEFRANCOIS, P. 1986: Black shale heaving at Sainte-Foy, Quebec, Canadá. *Can. J. Earth Sci.* 23:1774-1781.

BLOWES, D., PTACEK, C., JAMBOR, J., WEISENER, C. 2003: The Geochemistry of Acid Mine Drainage.- *Treatise on Geochemistry* 9:149-204.

CHINCHON, J.S., AYORA, C., AGUADO, A., GUIRADO, F. 1995: Influence of weathering of iron sulfides contained in aggregates on concrete durability. *Cement and Concrete Research*. 25(6):1264-1272.

DOLD, B. 2009: *Gestión de Residuos y Minería Sostenible. Basic Concepts in Enviromental Geochemistry of Sulfidic Mine-Waste Management.* Universidad Internacional de Andalucía. 37 pp.

DOUGHERTY, M.T., BAROSTTI, N.J. 1972: Structural damage and potentially expansive sulfide minerals. *Bull. Assoc. Eng. Geol.* v. 9. 2: 105-125.

FOX, D., C. ROBINSON, AND M. ZENTILLI. 1997. Pyrrhotite and associated sulphides and their relationship to acid rock drainage in the Halifax Formation, Meguma Group, Nova Scotia. *Atlantic Geology*. 33: 87-103.

GRATTAN-BELLEW, P.E., Eden, W.J. 1975: Concrete deterioration and floor heave due to biogeochemical weathering of underlying shale. *Can. Geotech. J.* 12: 323-378.

HAWKINS, A.B., PINCHES, G. M. 1987: Cause and significance of heave at Llandough Hospital, Cardiff - a case history of ground floor heave due to gypsum growth. *Quart. J.*

Eng. Geol. 20:41-57.

HOLDRIDGE, L. R. 1967: Life zone ecology. –Tropical Science Center. San José, Costa Rica. 206 pp.

IGARISHI, T. AND T. OYAMA. 1999. Deterioration of water quality in a reservoir receiving pyritebearing rock drainage and its geochemical modeling. Eng. Geol. 55:45-55.

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

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

LANAMMEUCR, Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (UGERVN) 2015: Informe de presencia de Drenaje Ácido de Roca en taludes de la Ruta Nacional 27. San José, Costa Rica. 43 pp.

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

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

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

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

MONTERO; W., 1999: El terremoto del 4 de Marzo de 1924 (Ms 7.0): ¿Un gran temblor interplaca relacionado al límite incipiente entre la placa Caribe y la Microplaca de Panamá?.- Rev. Geol. Amér. Central, 22: 25-62.

MONTERO; W., 2001: Neotectónica de la Región Central de Costa Rica: Frontera oeste de la microplaca de Panamá.- Rev. Geol. Amér. Central, 24:29-56.

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

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

OFFICE OF SOLID WASTE SPECIAL WASTE BRANCH, 1994: Technical Document Acid Mine Drainage Prediction.-52 pp. U. S. Environmental Protection Agency (USEPA).

ORNDORFF, Z., DANIELS, L. & DIAS, L. 2004: Evaluation of sulfidic materials in Virginia Highway corridors.- Environmental Geology 46:209-216.

PARIZEK, E.J. 1982: Geology and space beneath a city; Kansas City. Rev. in Eng. Geol. 5:63-73.

PENNER, E., GILLOTT, J. E., EDEN, W. J. 1970: Investigations of heave in Billings shale by mineralogical and biogeochemical methods. Can. Geo. J. 7: 333-338.

PORRAS, H., CASCANTE, M., GRANADOS, R. & ALVARADO G. E., 2012: Volcano-estratigrafía y tectónica del Valle Central Occidental y las estribaciones de los Montes del Aguacate a lo largo de la Ruta 27, Costa Rica. – Rev. Geol. Amer. Central, 47: 69-93.

RODRIGUEZ, G. (2010): El Sistema de Gestión Ambiental en el Control del Drenaje Ácido de Mina. 315 págs. Universidad Nacional de Ingeniería Lima, Perú [Tesis Maestría.].

RUIZ, S. (2004): Propuesta de un protocolo para la predicción y evaluación de la generación de drenaje ácido de roca en minas auríferas en explotación - 83 págs. Univ. de Costa Rica [Tesis Lic.].

SHANKS P. 2012: Hydrothermal alteration, Volcanic Massive Sulfide Occurrence Model. Scientific Investigation Report 2010-5070-C. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.

SLACK, J.F., 1993: Descriptive and grade-tonnage models for Besshi-type massive sulphide deposits, in Kirkham, R. V Sinclair, W.D., Thorpe, R.I., and Duke, J.M., eds., Mineral deposit modeling: Geological Association of Canada special Paper 40, p. 343-371.

SOBEK, A., SCHULLER, W., FREEMAN, J.&SMITH, R., 1978: Field and laboratory methods applicable to overburden and minesoils.-203 pp. U. S. Environmental Protection Agency (USEPA).

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.

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

MINISTERIO DE ENERGÍA Y MÍNAS DE PERÚ, (MEM-PERÚ), 2015: Anexo A: Geoquímica ambiental Métodos de análisis. Consulta de internet realizada en 2015, sitio web:

http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dgaam/estudios/tambogrande/file_001/anexos/11_Anexo%20XI%20Linea%20Base%20Geoquimica.pdf

ANEXOS

A continuación, se detalla el equipo, los materiales y reactivos necesarios para realizar las mediciones de pH. Además, se adjunta el protocolo de preparación de muestras y medición de pH, las cartas de petición y aceptación de LanammeUCR, las hojas electrónicas de Excel de las muestras procesadas y las secciones delgadas realizadas en esta investigación.

Anexo 1: Equipo, materiales y reactivos

Equipo requerido

Quebrador de rocas MIMMEL (Trifásico) placa UCR101280

Pulverizador LESSON (Trifásico) placa UCR270752

Tamiz #10 (200 μm abertura)

Horno para secado de muestras Heraeus® placa UCR191225

Balanza analítica de 0,1 g AND® placa UCR295602

Ultrapurificador de agua Direct 8 Milli-Q Millipore® placa UCR323671

Agitador electrónico Thermo Scientific CIMAREC® placa UCR329195

Pastilla magnética para agitación

pH metro OAKTON placa UCR329123

Cronómetro

Lista de materiales requeridos

3 frascos rectos de 50 mL de capacidad por cada muestra

3 Agitadores de vidrio

1 Pizeta

1 frasco recto de 250 mL de capacidad para limpieza del electrodo y recolección de desechos

2 Pipetas graduadas de 10 mL y de 25 mL

1 Recuperador de pastillas magnéticas

Reactivos requeridos

Disoluciones estándares de pH 4,0; pH 7,0 y pH 10,0 marca OAKTON,

Agua Ultra pura con resistividad 18,2 M Ω -cm (obtenida del ultrapurificador de agua del Laboratorio de Geoquímica de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica)

Anexo 2. Protocolos

Protocolo de preparación de muestra para medición de pH en pasta de muestras de taludes de carreteras.

1. Las rocas y los suelos tomados en el campo se trituran con un quebrador de rocas y con un pulverizador, en el caso que sea necesario, de lo contrario se pasa al punto 3.
2. Se limpia la trituradora, tanto en el depósito como en el triturador propiamente, con una brocha para evitar la contaminación cruzada.
3. El material triturado se recupera y se pone a secar en un horno a 110 ° C por 24 horas, para eliminar la humedad de la muestra.
4. Se tamiza el material en una malla #10, de 200 μ m.
5. Se descarta la fracción gruesa.
6. Se almacena el material en bolsas plásticas a temperatura ambiente para realizar posteriormente las mediciones de pH.

Protocolo de laboratorio para medición de pH en pasta de muestras de taludes de carreteras.

1. Se usan disoluciones patrón de pH 4,0, 7,0 y 10,0. Se colocan las disoluciones patrón en sendos beakers.
2. Se calibra el pH-metro (precisión de 0,01 unidades) con las disoluciones patrón, una vez por cada sesión de trabajo,

3. Se mide el pH de un blanco de agua destilada. Se verifica que esté dentro del intervalo $\text{pH} = 6,0$ y $\text{pH} = 7,5$.
4. En una balanza analítica se mide la masa $[20,000 \pm 0,0002]$ g de la muestra tamizada.
5. Con una probeta de 25,00 mL de capacidad, se mide el volumen $[20,0 \pm 0,5]$ mL de agua ultrapura con una resistividad de 18,2 M Ω -cm recién obtenida del purificador.
6. Se combina el material fino con el agua ultrapura en un beaker y se mezcla muy bien, con el agitador de vidrio, para generar una pasta homogénea en proporciones 1:1.
7. Las muestras se ponen en agitación en el agitador con una pastilla magnética por 10 minutos (medido con un cronómetro) a temperatura ambiente. Simultáneamente se controla que la temperatura de la muestra se mantenga dentro de un ámbito no superior a ± 2 °C, medido con el termómetro del pH-metro.
8. Se deja reposar por 10 minutos (medido con un cronómetro).
9. La pastilla magnética y el recuperador se deben limpiar exhaustivamente entre cada muestra para evitar la contaminación cruzada.
10. Medición de pH. Se introduce el electrodo de vidrio para hacer la medición electroquímica. Se espera a que se estabilice la medida (se obtiene la medición cuando no ocurren cambios en la medida del pH-metro). Se controla la temperatura de igual forma.
11. Este proceso de medición de pH, se hace por triplicado y se utiliza el promedio de las tres mediciones de cada muestra analizada. Se debe realizar un duplicado cada sesión de trabajo.
12. Se lava el electrodo de vidrio con agua destilada y se prepara para la siguiente muestra.

Notas:

- En todos los pasos hay que tomar las medidas necesarias para evitar la contaminación cruzada entre las muestras o los patrones, utilizando utensilios limpios.

- No se debe agregar más agua a los beakers con las muestras, pues disolvería el material y alteraría el resultado. En algunos casos puede ocurrir que sea necesario “ayudarlo” a la muestra para que el agitador magnético no se pegue con el material, pues al ser arcilloso tiende a pegarse dentro del beaker. Se puede hacer esto con un agitador de vidrio.
- Esta metodología es una adaptación ad hoc 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 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).

REFERENCIAS (Protocolo)

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

SOBEK, A., SCHULLER, W., FREEMAN, J.& SMITH, R., 1978: Field and laboratory methods applicable to overburden and minesoils.-203 págs. U. S. Environmental Protection Agency (USEPA).

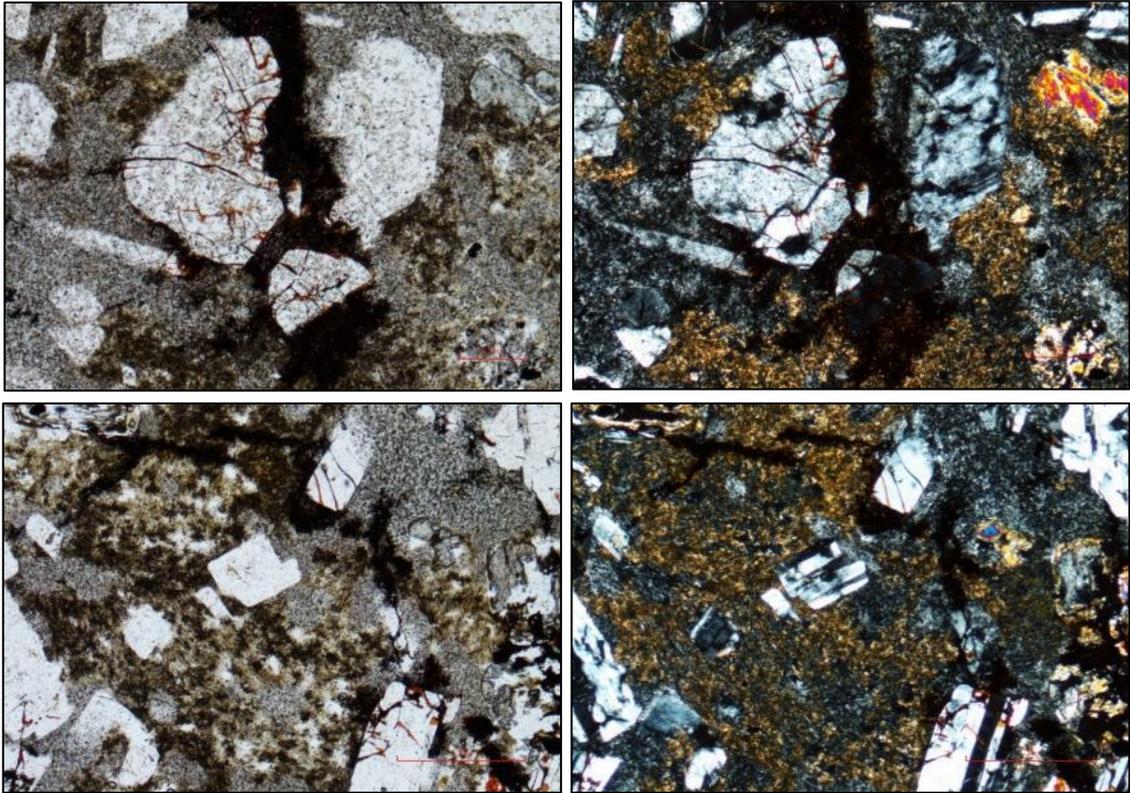
OFFICE OF SOLID WASTE SPECIAL WASTE BRANCH, 1994: Technical Document Acid Mine Drainage Prediction.-52 págs.U. S. Environmental Protection Agency (USEPA).

Anexo 3. Petrografía

SD-1 KM-45. Ubicación coordenadas CRTM-05: 449634,44E - 1097464,76N

Nicoles paralelos

Nicoles cruzados



Formación Grifo Alto

Andesita con textura hipocristalina porfírica, fenocristales xenomórficos a hipidiomórficos de piroxenos y plagioclasas, en algunos casos se observaron minerales fantasmas y vetillas de hematita cortando cristales de piroxeno y de plagioclasa. Plagioclasa: 35 %, augita: 10 %, matriz: 50 %, opacos: [3-5] %.

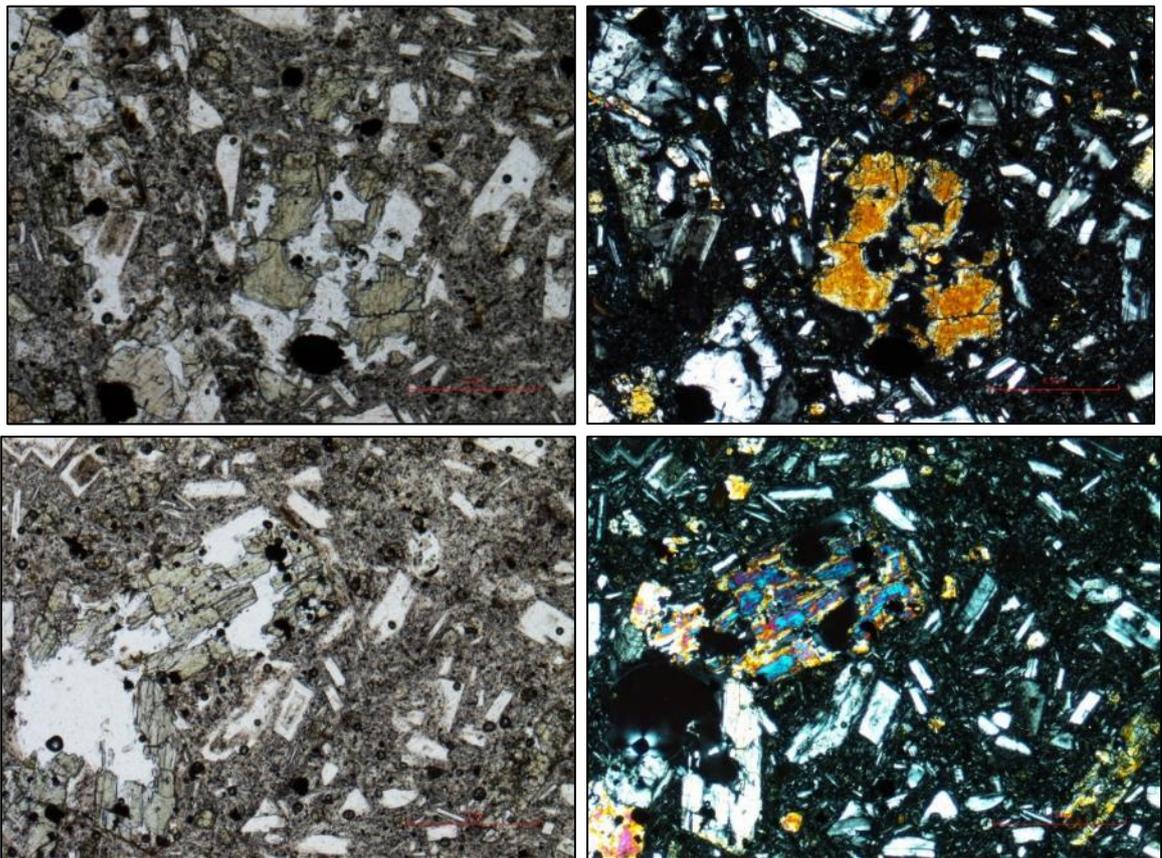
La matriz y la roca presentan alteración a: Carbonato 30 %, cuarzo secundario 15 %, pirita [5-8] %, arcillas [2-3] %.

Andesita

SD-2 KM 38+600. Ubicación coordenadas CRTM-05: 455347,78E - 1098589,76N

Nicoles paralelos

Nicoles cruzados



Formación Grifo Alto

La sección se realizó con uno de los bloques de la brecha, debido a que la muestra no tenía la consistencia necesaria para realizar una sección delgada que involucrara la matriz y los bloques.

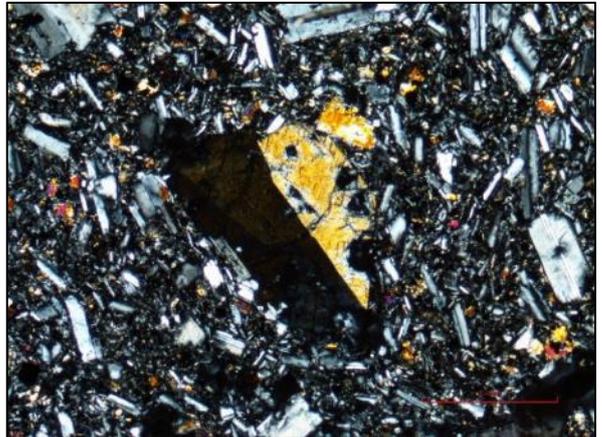
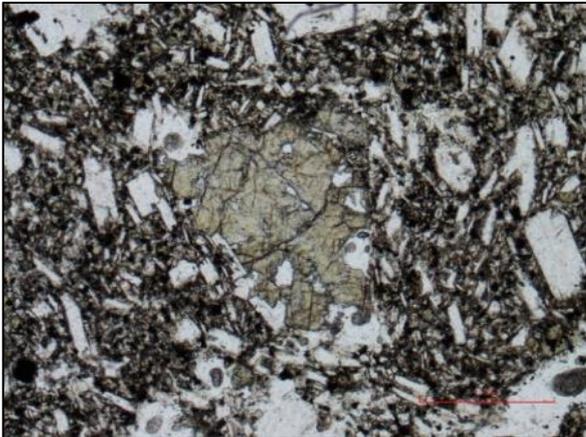
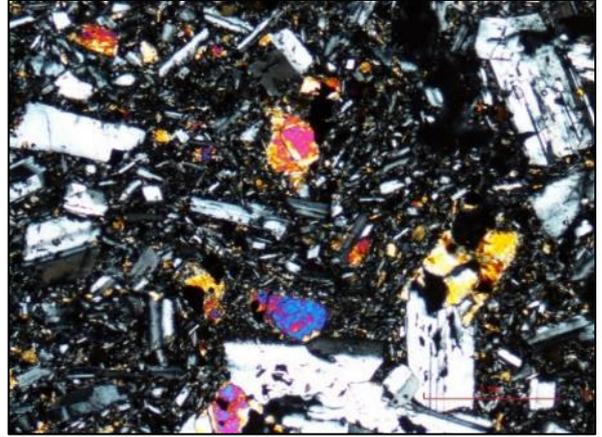
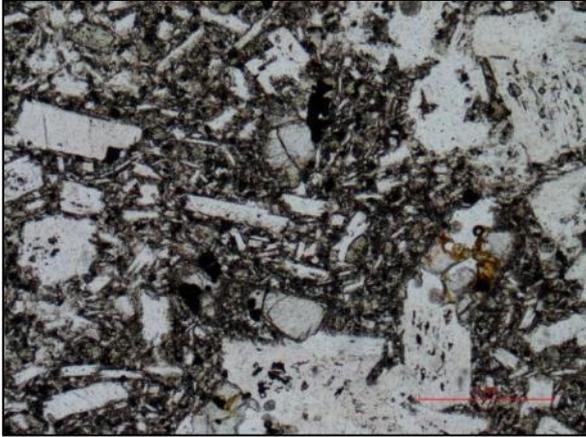
Textura hipocristalina porfírica, con fenocristales hipidiomórficos a xenomórficos de plagioclasas macladas y con zonación, augita con maclas (algunas con reloj de arena) y ocasionalmente textura en corona. La matrix tiene una textura intersertal. Plagioclasa: 35 %, augita: 15 %, hipersteno: 1%, matriz: 48 %, arcillas: 1 %, opacos: [1-2] %.

Andesita

SD-3 KM-47. Ubicación coordenadas CRTM-05: 448243,63E - 1096744,74N

Nicoles paralelos

Nicoles cruzados



Formación Grifo Alto

Textura hipocrystalina porfirítica, fenocristales hipidiomórficos a xenomórficos de piroxeno y plagioclasa, los que presentan en algunos casos halos de reacción. La matriz tiene una textura intersertal. Plagioclasa: 35 %, olivinos iddingsitizados: 2 %, augita: : 4 %, hipersteno: 4 %, matriz: 53 %, opacos: [1-2] %.

Andesita

Anexo 4. Cartas de solicitud y aceptación de Práctica Dirigida

San José, 27 Abril 2015

Señores

Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional

ATN: Roy Barrantes

SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN PARA REALIZACIÓN DE PRÁCTICA DIRIGIDA

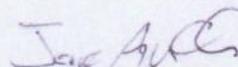
Reciba un cordial saludo,

La presente carta sirve de solicitud formal de realización del Trabajo Final de Graduación en la modalidad de Práctica Dirigida con LanammeUCR por parte del estudiante Jorge Aguilar Chavarría para optar por el grado de Licenciado en Geología de la Universidad de Costa Rica. La misma consistirá en el análisis de drenaje ácido de roca entre los estacionamientos de los kilómetros 37+000 a 48+000 de la ruta nacional 27. El trabajo será supervisado por el geólogo Pablo Ruiz C.

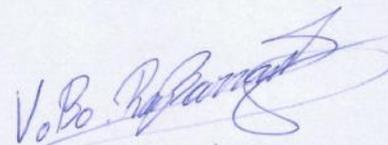
Tanto la Universidad de Costa Rica en su Laboratorio de Materiales Lanamme, las comunidades cercanas a la zona de estudio, como el estudiante, se verán beneficiados con la realización de este proyecto, el cual tendrá avances informativos cada 6 semanas, con criterios técnicos de calidad que darán oportunidades de mejora en la vía nacional.

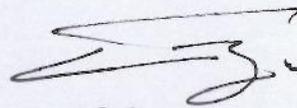
Para notificación de su decisión puede contactarse al correo electrónico geojeach@gmail.com

Agradeciendo de antemano su atención,


Jorge Aguilar Chavarría

Geólogo


04/05/2015


URB.

04 de Mayo del 2015,

San José Costa Rica

Señores de la Escuela Centroamericana de Geología,

Por este medio se les informa que hemos aceptado la solicitud del estudiante de geología Jorge Aguilar Chavarría para realizar el trabajo final de graduación con la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional de LanammeUCR. El trabajo como él lo indica, será sobre la caracterización geoquímica de varios taludes en la Ruta Nacional No. 27 para identificar la presencia de drenaje ácido de rocas.

El trabajo de campo, los avances del proyecto y el informe final, estarán supervisados por parte de Lanamme por el Dr. Pablo Ruiz Cubillo. De parte de la ECG se contará con la colaboración de Stephanie Murillo y Jairo García. Se esperan recibir por parte del estudiante los informes de avance cada dos meses a partir del inicio del proyecto y un informe final con los resultados en el tiempo propuesto en el anteproyecto.

Agradecemos de antemano toda la colaboración que se pueda dar con la realización de este proyecto.

Saludos Cordiales



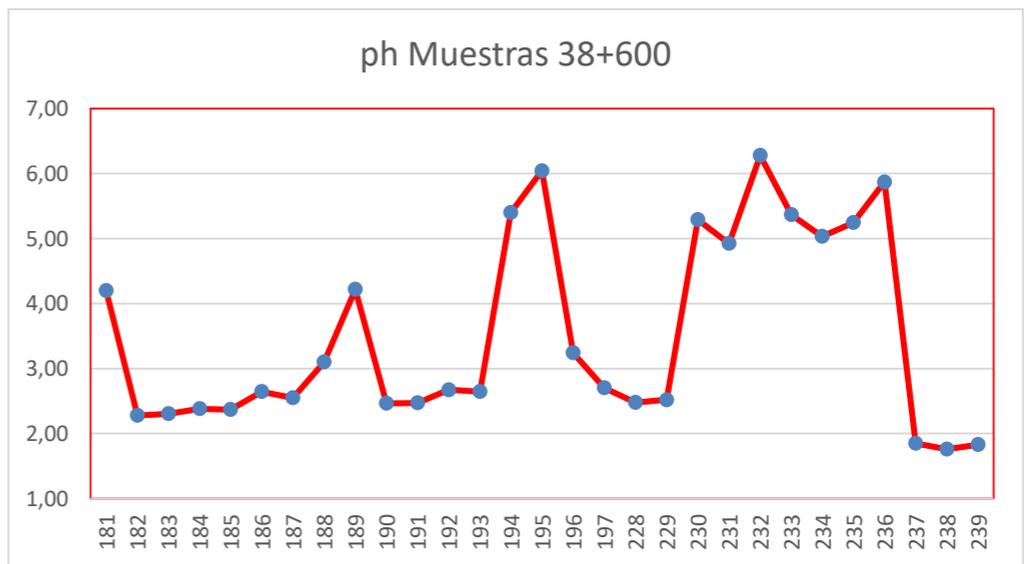
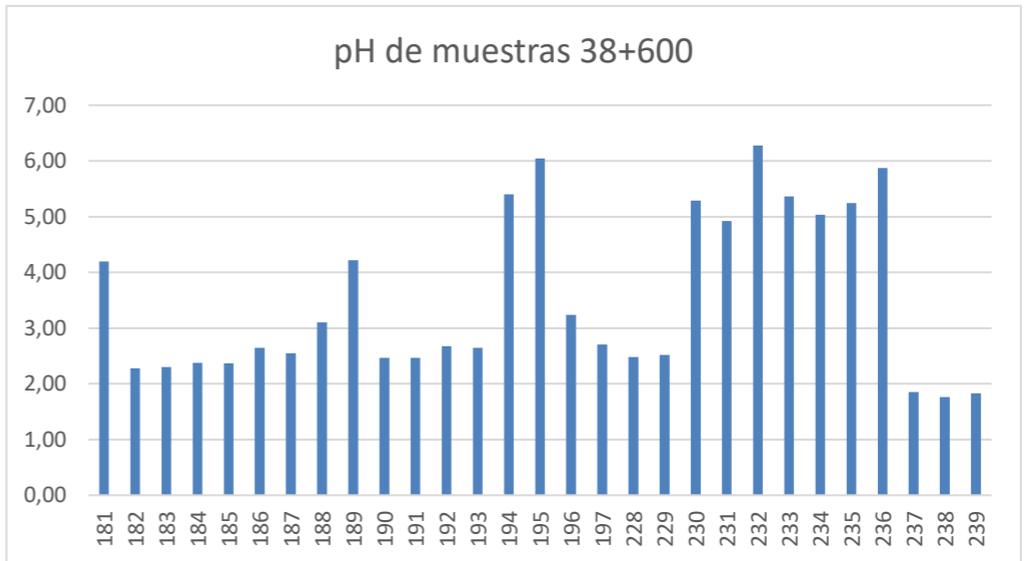
Ing. Roy Barrantes Jiménez
Coordinador UGERVN
PITRA-LanammeUCR



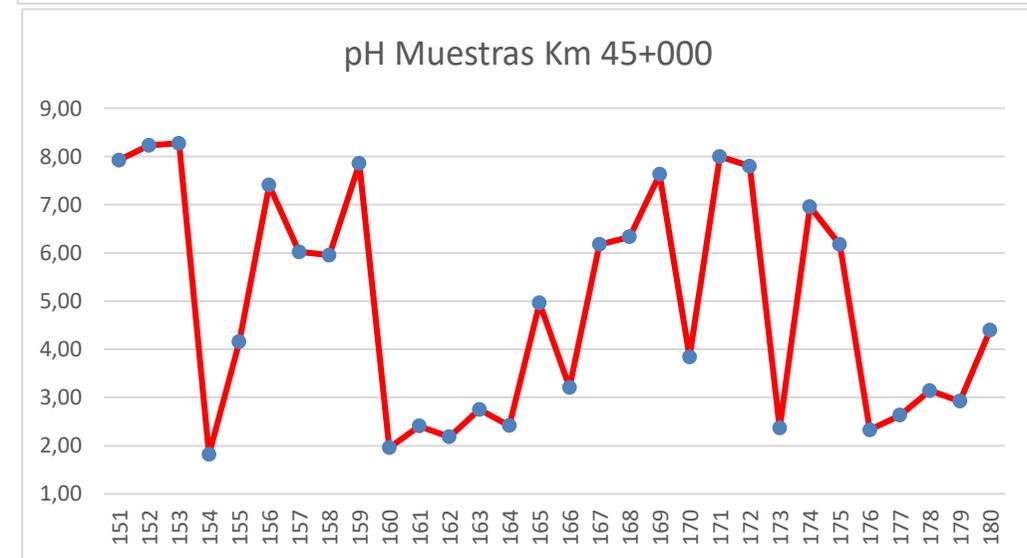
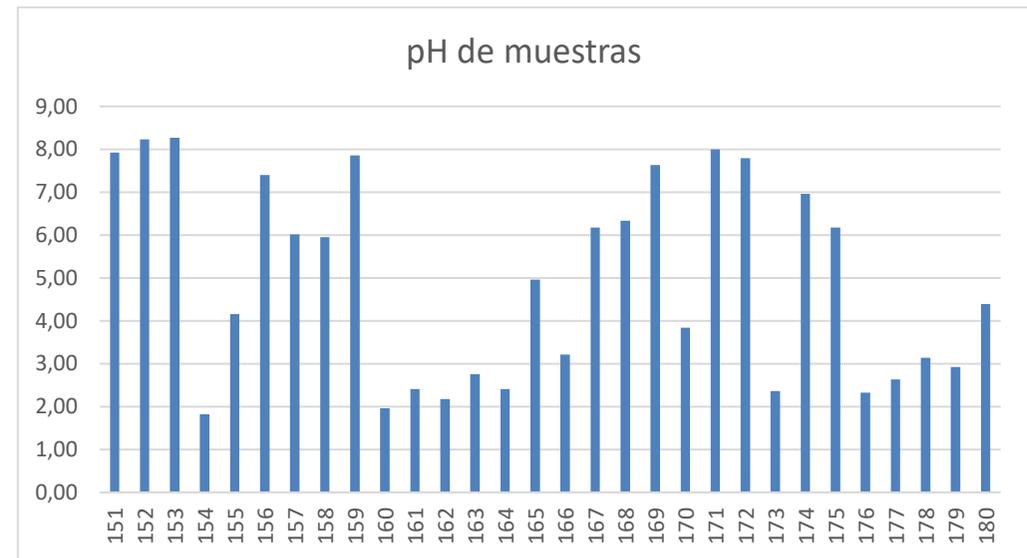
Vo. Bo. Ing. Guillermo Loria
Coordinador PITRA

Anexo 5. Tablas de tratamiento de pH por talud y total

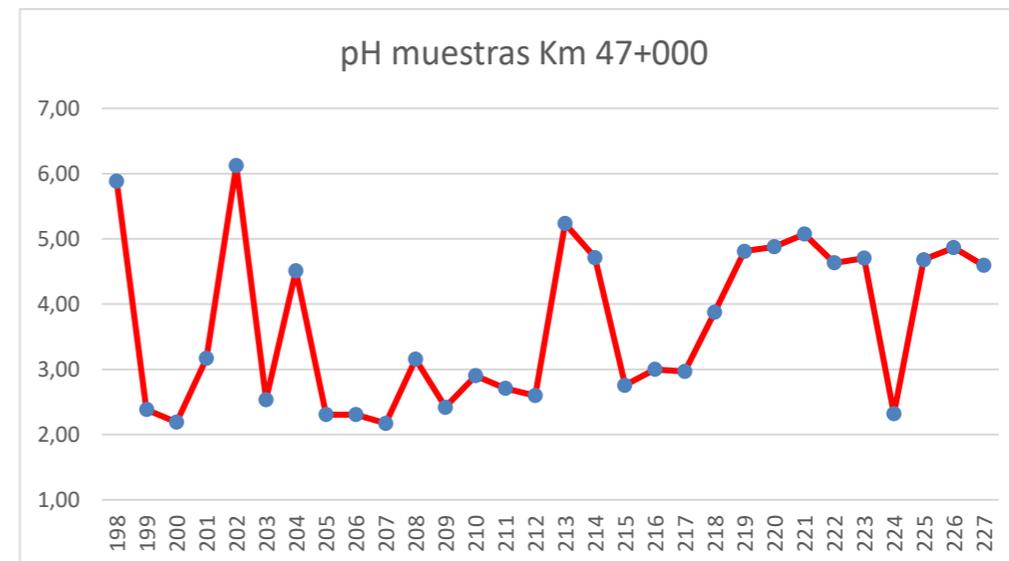
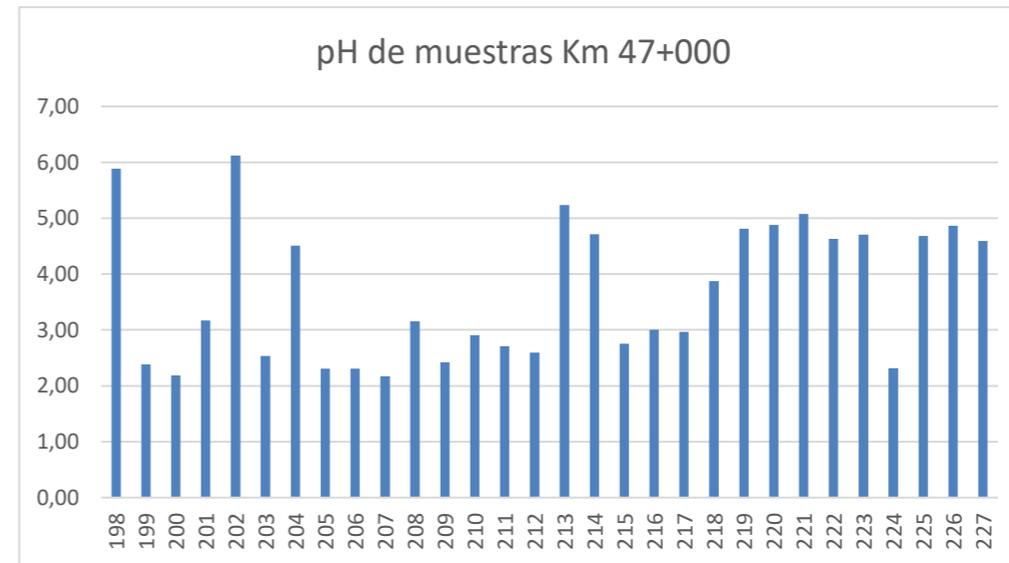
Código Figuras	x	y	Promedio Medición de pH	Mediana pH	Promedio Temp
181	455233,35	1098571,82	4,20	4,13	26,73
182	455240,33	1098572,95	2,28	2,27	26,73
183	455249,23	1098571,45	2,30	2,31	26,97
184	455254,99	1098573,73	2,38	2,41	27,63
185	455265,60	1098572,45	2,37	2,36	26,67
186	455276,48	1098570,35	2,65	2,66	27,03
187	455284,05	1098572,93	2,55	2,57	26,90
188	455301,64	1098576,08	3,10	3,02	24,57
189	455308,34	1098579,80	4,22	4,19	25,20
190	455318,60	1098584,88	2,46	2,47	26,80
191	455321,58	1098586,30	2,47	2,46	26,67
192	455326,76	1098586,25	2,67	2,66	25,50
193	455337,14	1098588,78	2,65	2,65	26,03
194	455347,78	1098589,76	5,40	5,41	25,63
195	455354,97	1098597,62	6,04	6,00	25,87
196	455401,23	1098646,90	3,24	3,24	26,37
197	455411,32	1098657,47	2,70	2,70	25,93
228	455396,70	1098592,60	2,48	2,48	27,33
229	455413,90	1098675,20	2,52	2,52	27,27
230	455355,09	1098666,40	5,29	5,32	27,40
231	455359,66	1098668,20	4,92	4,95	27,17
232	455366,06	1098671,00	6,28	6,35	27,17
233	455377,03	1098673,10	5,37	5,50	27,43
234	455363,90	1098656,26	5,03	5,03	26,90
235	455367,57	1098659,30	5,24	5,21	26,67
236	455372,10	1098661,78	5,87	5,86	26,60
237	455382,48	1098653,16	1,85	1,85	27,27
238	455393,76	1098658,99	1,76	1,77	28,10
239	455413,89	1098675,24	1,83	1,83	27,23
promedio km 38+600			3,52	3,52	26,68
valor mayor			6,28		
valor menor			1,76		
promedio temp			26,68		



Código Figuras	x	y	Promedio Medición de pH	Mediana pH	Promedio Temp
151	449562,03	1097437,04	7,92	8,05	25,23
152	449573,85	1097436,30	8,23	8,25	25,83
153	449579,67	1097437,87	8,27	8,28	26,13
154	449593,67	1097433,78	1,82	1,81	27,57
155	449602,01	1097434,22	4,15	4,18	27,50
156	449612,78	1097434,03	7,40	7,41	26,63
157	449622,05	1097435,28	6,02	6,04	27,07
158	449632,14	1097436,66	5,95	5,94	27,30
159	449641,85	1097437,54	7,85	7,84	26,50
160	449651,65	1097439,76	1,96	1,95	26,70
161	449661,71	1097441,38	2,41	2,40	27,10
162	449671,44	1097444,17	2,18	2,19	26,87
163	449682,77	1097448,95	2,75	2,75	26,60
164	449691,20	1097452,25	2,41	2,41	26,17
165	449698,98	1097457,31	4,96	4,96	26,07
166	449615,53	1097455,63	3,21	3,19	27,20
167	449627,69	1097456,13	6,17	6,20	26,97
168	449636,25	1097458,66	6,33	6,34	26,87
169	449645,33	1097455,92	7,63	7,64	27,27
170	449657,96	1097458,96	3,84	3,85	24,20
171	449666,06	1097461,31	8,00	8,02	26,53
172	449674,49	1097463,23	7,80	7,95	27,00
173	449615,40	1097463,54	2,37	2,36	26,33
174	449625,85	1097463,95	6,96	7,14	26,20
175	449634,44	1097464,76	6,17	6,19	26,43
176	449644,99	1097465,31	2,33	2,33	26,33
177	449614,81	1097409,60	2,63	2,63	26,47
178	449635,91	1097410,93	3,14	3,13	26,33
179	449659,12	1097408,74	2,92	2,93	24,17
180	449667,27	1097410,37	4,39	4,40	24,37
promedio km45			4,94	4,96	
valor mayor			8,27		26,40
valor menor			1,82		
promedio temp			26,40		



Código Figuras	x	y	Promedio Medición de pH	Mediana pH	Promedio Temp
198	448192,38	1096759,73	5,88	5,87	26,13
199	448196,53	1096757,63	2,39	2,39	25,27
200	448200,34	1096756,92	2,19	2,19	25,23
201	448202,89	1096757,01	3,17	3,17	25,00
202	448213,57	1096754,28	6,12	6,10	26,60
203	448220,51	1096750,75	2,54	2,53	25,00
204	448226,69	1096748,27	4,51	4,50	25,60
205	448232,17	1096746,94	2,31	2,32	26,73
206	448243,63	1096744,74	2,31	2,30	26,00
207	448246,25	1096744,23	2,17	2,17	25,13
208	448264,91	1096734,71	3,15	3,15	25,13
209	448295,87	1096725,52	2,42	2,40	25,83
210	448225,40	1096741,43	2,90	2,90	27,17
211	448231,45	1096739,82	2,71	2,71	26,47
212	448238,22	1096737,69	2,60	2,60	25,73
213	448242,95	1096735,03	5,23	5,20	25,00
214	448247,41	1096733,19	4,71	4,71	25,00
215	448252,73	1096732,12	2,76	2,74	26,53
216	448255,74	1096733,10	3,00	3,00	25,00
217	448263,77	1096729,16	2,97	2,96	25,00
218	448272,54	1096727,02	3,88	3,88	25,00
219	448252,09	1096725,92	4,81	4,82	26,67
220	448246,71	1096727,85	4,88	4,90	25,83
221	448241,10	1096729,81	5,07	4,95	25,43
222	448225,26	1096734,46	4,63	4,63	26,07
223	448232,41	1096732,60	4,70	4,69	26,47
224	448219,30	1096736,93	2,32	2,32	26,37
225	448228,86	1096728,35	4,68	4,64	24,83
226	448236,16	1096727,85	4,87	4,86	26,37
227	448242,78	1096727,03	4,59	4,60	25,33
Promedio km47			3,68	3,67	
valor mayor			6,12		25,73
valor menor			2,17		
promedio temp			25,70		



Código	Figuras	Muestras Ruta Nacional N° 27 Kilometros 45+000, 38+600, 47+000					Masa (g)			Medición de temperatura (°C)			Medición de pH			Promedio medición masa	Promedio medición temp.	Promedio Medición de pH	Blancos de Agua	Mediana pH
		Código Lanamme (km38+600)	Código de Campo	x	y	Desviación estándar pH														
151		K45+000-151	449562,03	1097437,04	0,38	20,001	20,001	20,001	25,2	25,4	25,1	7,50	8,05	8,22	20,00	25,23	7,92	7,15 a 25 celcius.	8,05	
152		K45+000-152	449573,85	1097436,30	0,09	20,002	20,000	20,002	25,5	25,8	26,2	8,13	8,25	8,31	20,00	25,83	8,23		8,25	
153		K45+000-153	449579,67	1097437,87	0,09	20,001	20,001	20,001	26,0	26,3	26,1	8,18	8,28	8,36	20,00	26,13	8,27		8,28	
154		K45+000-154	449593,67	1097433,78	0,02	20,002	20,000	20,000	28,0	27,0	27,7	1,81	1,84	1,80	20,00	27,57	1,82		1,81	
155		K45+000-155	449602,01	1097434,22	0,10	20,001	20,002	20,006	26,5	27,3	28,7	4,24	4,18	4,04	20,00	27,50	4,15		4,18	
156		K45+000-156	449612,78	1097434,03	0,20	20,003	20,001	20,002	26,7	26,8	26,4	7,20	7,41	7,60	20,00	26,63	7,40	7,13 a 27,4 celcius	7,41	
157		K45+000-157	449622,05	1097435,28	0,08	20,000	20,000	20,000	27,0	27,1	27,1	6,09	6,04	5,93	20,00	27,07	6,02		6,04	
158		K45+000-158	449632,14	1097436,66	0,05	20,000	20,001	20,001	27,2	27,2	27,5	5,91	5,94	6,01	20,00	27,30	5,95		5,94	
159		K45+000-159	449641,85	1097437,54	0,06	20,009	20,001	20,001	26,6	26,3	26,6	7,80	7,84	7,92	20,00	26,50	7,85		7,84	
160		K45+000-160	449651,65	1097439,76	0,02	20,007	20,009	20,002	26,6	26,7	26,8	1,94	1,98	1,95	20,01	26,70	1,96		1,95	
161		K45+000-161	449661,71	1097441,38	0,04	20,001	20,003	20,003	27,1	27,2	27,0	2,45	2,37	2,40	20,00	27,10	2,41		2,40	
162		K45+000-162	449671,44	1097444,17	0,04	20,001	20,001	20,000	26,8	27,1	26,7	2,14	2,19	2,21	20,00	26,87	2,18		2,19	
163		K45+000-163	449682,77	1097448,95	0,03	20,000	20,003	20,002	26,4	26,8	26,6	2,78	2,73	2,75	20,00	26,60	2,75		2,75	
164		K45+000-164	449691,20	1097452,25	0,02	20,001	20,002	20,000	26,3	26,0	26,2	2,40	2,43	2,41	20,00	26,17	2,41	7,3 con 28 celcius	2,41	
165		K45+000-165	449698,98	1097457,31	2,87	20,000	20,001	20,003	26,1	26,0	26,1	5,15	4,77	4,92	20,00	26,07	4,96		4,96	
		Duplicados	154,00	449593,67	1097433,78	0,01	20,001	20,001	20,000	27,2	27,1	26,8	1,82	1,84	1,83	20,00	27,03	1,83		
		Duplicados	159,00	449641,85	1097437,54	0,10	20,000	20,000	20,001	27,0	26,8	27,1	7,70	7,83	7,90	20,00	26,97	7,81		
		Duplicados	164,00	449691,20	1097452,25	0,04	20,001	20,002	20,001	26,3	26,8	26,4	2,34	2,36	2,41	20,00	26,50	2,37		
166		K45+000-166	449615,53	1097455,63	0,03	20,005	20,003	20,009	27,0	26,9	27,7	3,19	3,19	3,25	20,01	27,20	3,21		3,19	
167		K45+000-167	449627,69	1097456,13	0,06	20,009	20,006	20,003	26,9	26,8	27,2	6,10	6,20	6,22	20,01	26,97	6,17		6,20	
168		K45+000-168	449636,25	1097458,66	0,07	20,001	20,007	20,003	27,3	26,7	26,6	6,34	6,39	6,26	20,00	26,87	6,33		6,34	
169		K45+000-169	449645,33	1097455,92	0,03	20,000	20,004	20,005	27,5	27,3	27,0	7,64	7,60	7,65	20,00	27,27	7,63		7,64	
170		K45+000-170	449657,96	1097458,96	0,05	20,001	20,002	20,003	26,4	26,2	20,0	3,85	3,88	3,79	20,00	24,20	3,84		3,85	
171		K45+000-171	449666,06	1097461,31	0,08	20,008	20,003	20,000	26,3	26,5	26,8	7,91	8,02	8,07	20,00	26,53	8,00		8,02	
172		K45+000-172	449674,49	1097463,23	0,41	20,003	20,002	20,002	26,8	27,0	27,2	7,33	7,95	8,11	20,00	27,00	7,80		7,95	
173		K45+000-173	449615,40	1097463,54	0,01	20,004	20,002	20,003	26,3	26,7	26,0	2,36	2,38	2,36	20,00	26,33	2,37		2,36	
174		K45+000-174	449625,85	1097463,95	0,47	20,0036	20,0036	20,0044	26,4	26,2	26,0	6,43	7,14	7,31	20,00	26,20	6,96		7,14	
175		K45+000-175	449634,44	1097464,76	0,05	20,006	20,0016	20,004	26,7	26,4	26,2	6,12	6,19	6,21	20,00	26,43	6,17		6,19	
176		K45+000-176	449644,99	1097465,31	0,03	19,9998	20,0062	20,0054	26,3	26	26,7	2,35	2,33	2,30	20,00	26,33	2,33		2,33	
177		K45+000-177	449614,81	1097409,60	0,03	20,002	20,001	20,002	26,3	26,2	26,9	2,60	2,66	2,63	20,00	26,47	2,63		2,63	
178		K45+000-178	449635,91	1097410,93	0,02	20,006	20,003	20,003	26,0	26,3	26,7	3,13	3,13	3,17	20,00	26,33	3,14		3,13	
179		K45+000-179	449659,12	1097408,74	0,02	20,004	20,001	20,006	24,3	24,2	24,0	2,90	2,93	2,94	20,00	24,17	2,92	7,1 con 25,4 celcius	2,93	
180		K45+000-180	449667,27	1097410,37	0,05	20,005	20,004	20,000	24,5	24,4	24,2	4,40	4,44	4,34	20,00	24,37	4,39		4,40	
		Duplicados	173,00	449615,40	1097463,54	0,02	20,002	20,004	20,002	26,0	26,2	26,1	2,39	2,37	2,35	20,00	26,10	2,37		
		Duplicados	179,00	449659,12	1097408,74	0,13	20,008	20,002	20,003	24,7	24,8	24,7	3,22	3,01	2,99	20,00	24,73	3,07		
181	M-1927-15	K38+600-181	455233,35	1098571,82	0,12	20,008	20,001	20,005	26,7	26,8	26,7	4,12	4,13	4,34	20,00	26,73	4,20	7,05 a 25celcius	4,13	
182	M-1928-15	K38+600-182	455240,33	1098572,95	0,02	20,006	20,002	20,002	26,8	26,7	26,7	2,30	2,27	2,26	20,00	26,73	2,28		2,27	
183	M-1929-15	K38+600-183	455249,23	1098571,45	0,03	20,004	20,009	20,002	27,0	27,1	26,8	2,31	2,33	2,27	20,00	26,97	2,30		2,31	
184	M-1930-15	K38+600-184	455254,99	1098573,73	0,08	20,008	20,006	20,004	27,2	27,9	27,8	2,4	2,4	2,3	20,01	27,63	2,38		2,41	
185	M-1931-15	K38+600-185	455265,60	1098572,45	0,03	20,009	20,008	20,005	26,3	26,9	26,8	2,35	2,36	2,40	20,01	26,67	2,37		2,36	
186	M-1932-15	K38+600-186	455276,48	1098570,35	0,02	20,002	20,003	19,998	27,4	27,4	26,3	2,62	2,66	2,66	20,00	27,03	2,65		2,66	
187	M-1933-15	K38+600-187	455284,05	1098572,93	0,07	20,006	20,005	20,001	27,2	27,0	26,5	2,47	2,61	2,57	20,00	26,90	2,55		2,57	
188		K38+600-188	455301,64	1098576,08	0,15	20,005	20,003	20,002	24,5	24,5	24,7	3,02	3,01	3,27	20,00	24,57	3,10		3,02	
189		K38+600-189	455308,34	1098579,80	0,09	20,002	20,001	20,003	25,2	25,2	25,2	4,19	4,14	4,32	20,00	25,20	4,22		4,19	
190	M-1934-15	K38+600-190	455318,60	1098584,88	0,02	20,005	20,001	20,004	27,0	26,7	26,7	2,48	2,47	2,44	20,00	26,80	2,46		2,47	
191	M-1935-15	K38+600-191	455321,58	1098586,30	0,04	20,004	20,003	20,002	26,7	26,8	26,5	2,51	2,46	2,44	20,00	26,67	2,47	7,15 a 25,8celcius	2,46	
192		K38+600-192	455326,76	1098586,25	0,04	20,004	20,003	20,007	25,7	25,5	25,3	2,66	2,72	2,64	20,00	25,50	2,67		2,66	
193	M-1936-15	K38+600-193	455337,14	1098588,78	0,04	20,001	20,000	20,005	26,2	26,0	25,9	2,61	2,65	2,68	20,00	26,03	2,65		2,65	
194		K38+600-194	455347,78	1098589,76	0,03	20,001	20,002	20,008	25,4	25,9	25,6	5,37	5,42	5,41	20,00	25,63	5,40		5,41	
195	M-1937-15	K38+600-195	455354,97	1098597,62	0,09	20,006	20,003	20,006	26,0	25,6	26,0	5,98	6,15	6,00	20,00	25,87	6,04		6,00	
196		K38+600-196	455401,23	1098646,90	0,00	20,003	20,001	20,003	26,1	26,1	26,9	3,24	3,24	3,24	20,00	26,37	3,24		3,24	
197	M-1938-15	K38+600-197	455411,32	1098657,47	0,01	20,006	20,002	20,006	26,1	26,0	25,7	2,70	2,71	2,70	20,00	25,93	2,70		2,70	
		Duplicados	190,00	455318,60	1098584,88	0,01	20,001	20,000	20,001	26,8	26,7	26,7	2,46	2,46	2,48	20,00	26,73	2,47		
		Duplicados	197,00	455411,32	1098657,47	0,01	20,001	20,004	20,004	26,0	26,6	26,5	2,67	2,68	2,68	20,00	26,37	2,68		
198		K47+000-198	448192,38	1096759,73	0,05	20,004	20,002	20,004	26,7	25,8	25,9	5,84	5,87	5,94	20,00	26,13	5,88	7,1 a 25,5 celcius	5,87	
199		K47+000-199	448196,53	1096757,63	0,04	20,001	20,002	20,004	25,4	25,2	25,2	2,39	2,42	2,35	20,00	25,27	2,39		2,39	
200		K47+000-200	448200,34	1096756,92	0,01	20,003	20,002	20,003	25,7	25,1	24,9	2,19	2,20	2,18	20,00	25,23	2,19		2,19	
201		K47+000-201	448202,89	1096757,01	0,02	20,002	20,002	20,003	25,0	25,0	25,0	3,19	3,17	3,15	20,00	25,00	3,17		3,17	
202		K47+000-202	448213,57	1096754,28	0,04	20,001	20,001	20,001	27,0	26,5	26,3	6,10	6,09	6,17	20,00	26,60	6,12		6,10	
203		K47+000-203	448220,51	1096750,75	0,02	20,000	20,003	20,005	25,0	25,0	25,0	2,56	2,52	2,53	20,					