

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ciencias
Escuela Centroamericana de Geología

Tesis de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en
Geología

**METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL EFECTO DEL DRENAJE
ÁCIDO EN LAS ROCAS Y EN EL CONCRETO LANZADO EN LOS TALUDES
DE LA RUTA NACIONAL No. 27 (SAN JOSÉ – CALDERA).**

Realizada por:

Carolina Suárez Matarrita

Agosto 2017

Tesis sometida y aceptada por el Tribunal del Trabajo Final de Graduación como
requisito para optar por el grado académico de Licenciatura en Geología.



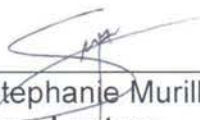
Dr. German Vidaurre Fallas
Presidente del Tribunal



Dr. Paulo Ruiz Cubillo
Director de Tesis



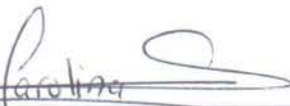
Ing. Roy Barrantes Jimenez
Lector



M.Sc. Stephanie Murillo Maikut
Lectora



Dra. María del Pilar Madrigal Quesada
Miembro del Tribunal



Carolina María Suárez Matarrita
Candidata

Dedicatoria

**Dedico este trabajo a mis padres y mi familia
por apoyarme incondicionalmente,
ayudarme y motivarme a cumplir mis sueños,
con esfuerzo y dedicación.**

Agradecimientos

Toda actividad humana es una labor de conjunto,
es la contribución en forma coordinada de distintas personas e instituciones
y la vía más segura para obtener éxito.

Esta investigación es el producto de esa interacción y contribución,
de la ayuda de profesionales y asistentes en geología, ingeniería,
química, y técnicos de LanammeUCR y de la Escuela Centroamericana de Geología.

Al Dr. Paulo Ruiz, a la M.Sc. Stephanie Murillo y al Ing. Roy Barrantes,
un profundo y sincero agradecimiento por su abnegada colaboración
y gran desprendimiento en la orientación
y guía de este y otros trabajos.

A mis padres, hermanos y demás personas que con su estímulo
y colaboración me permitieron mantener viva la motivación
durante los años de estudio en mi carrera de Geología,
mi más sincero agradecimiento.

Índice de Contenido

Dedicatoria.....	iii
Agradecimiento.....	iv
Índice de Contenido.....	v
Índice de Cuadros.....	viii
Índice de Figuras.....	xi
Resumen.....	xvi
Abreviaturas.....	xviii
Dedicatoria.....	3
Agradecimientos.....	4
Abreviaturas.....	18
CAPÍTULO I.....	1
1. Introducción.....	1
1.1 Problema.....	2
1.2 Justificación.....	3
1.3 Alcances y limitaciones.....	5
1.4 Importancia de este estudio.....	6
1.5 Hipótesis de trabajo.....	7
1.6 Objetivos.....	7
1.6.1 Objetivo general.....	7
1.6.2 Objetivos específicos.....	8
1.7 Ubicación de la zona de estudio.....	8
1.8 Definición de zona de estudio y sitios de interés.....	9
CAPÍTULO II.....	10
2. Marco teórico.....	10
2.1 Concreto y sus efectos.....	10
2.2 Metodologías existentes.....	15
2.3 Procesos químicos al contacto con el DAR.....	17

2.4 Características de las rocas como agregados para concreto	22
2.5 Características generales típicas del DAR	23
2.6 Descripción microscópica	23
2.7 Geología	28
2.8 Descripción de estado de los taludes	29
2.8.1 Estacionamiento km 38+600	29
2.8.2 Estacionamiento km 47+000	35
2.8.3 Estacionamiento km 48+000	36
CAPÍTULO III	39
3. METODOLOGÍA	39
3.1 Preparación y extracción de muestras de concreto lanzado	41
3.2 Muestreo de rocas aflorantes.	43
3.2 Procesos de preparación y medición de muestras	46
3.5 Tipos de ensayo	49
3.5.1 Ensayo in situ.....	49
3.5.2 Ensayo de Ciclo Continuo	54
3.5.3 Ensayo de Ciclo Alternado.....	56
3.5.4 Ensayo de núcleos expuestos directamente al flujo de DAR.	58
CAPÍTULO IV.....	62
4. Resultados	62
4.1 Condición inicial.....	62
4.1.1 Concreto lanzado	62
4.1.2 Brecha volcánica.....	65
4.1.3 Andesita	67
4.2 Ensayo <i>In Situ</i>	70
4.2.1 Estacionamiento km 38+600	70
4.2.2 Estacionamiento km 47+000	72
4.2.3 Estacionamiento km 48+000	73
4.3 Ensayo de Ciclo Continuo	78
4.4 Ensayo de Ciclo Alternado	95

4.4.1 Muestras sumergidas en disolución con valor de pH 2	96
4.4.2 Muestras sumergidas en disolución con valor de pH 4	113
4.4.3 Muestras sumergidas en disolución con valor de pH 5,5	124
4.5 Ensayo de núcleos expuestos directamente al flujo de DAR.....	135
4.5.1 Ensayo Ducha ácida in situ	135
4.5.2 Ensayo Ducha ácida en laboratorio	137
CAPÍTULO V	141
5.1 Discusión de resultados.....	141
5.1.1 Ensayo <i>In situ</i> - Ciclo Continuo con muestras de concreto lanzado ...	141
5.1.2 Ensayo de Ciclo Alternado – Ensayo de Ciclo Continuo.....	147
5.1.3 Ciclo Alternado - Ensayo de Ducha ácida en campo	154
5.1.4 Ensayo de Ducha ácida de campo y Ducha ácida de laboratorio	156
5.2 Conclusiones	158
5.3 Recomendaciones	165
6. Referencias	167
7. Anexos	175

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Ensayos del efecto del DAR en concreto.	15
Cuadro 2. Rocas y su uso en concreto (Chan et al., 2003).....	22
Cuadro 3. Comparación de las características ópticas de yeso y la etringita.	27
Cuadro 4. Resultados geoquímicos del análisis de muestras de agua en la RN-27 de acuerdo con Ruiz et al. 2015 y del presente trabajo.	34
Cuadro 5. Diseño de la mezcla de concreto.	41
Cuadro 6. Características afloramiento en el estacionamiento km 48+000	44
Cuadro 7. Características afloramiento del estacionamiento km 39+000.	45
Cuadro 8. Ubicación de muestras de ensayo <i>in situ</i> km 38+600.	51
Cuadro 9. Ubicación de muestras de ensayo <i>in situ</i> 47+000	52
Cuadro 10. Ubicación de muestras de ensayo <i>in situ</i> 48+000	53
Cuadro 11. Descripción microscópica del concreto lanzado en secciones delgadas, de las muestras en su estado inicial.	63
Cuadro 12. Concentraciones de elementos que componen el concreto lanzado, provenientes del espectro elemental en tres sitios diferentes.	64
Cuadro 13. Descripción microscópica de la brecha volcánica en secciones delgadas, de las muestras en su estado inicial.	65
Cuadro 14. Concentraciones de elementos que componen la brecha volcánica, provenientes del espectro elemental en tres sitios diferentes.	67
Cuadro 15. Descripción microscópica de la andesita recristalizada en secciones delgadas, de las muestras en su estado inicial.	68
Cuadro 16. Concentraciones de elementos que componen la andesita recristalizada, provenientes del espectro elemental en tres sitios diferentes.	69
Cuadro 17. Cambio de masa de las muestras en el estacionamiento km 38+600.71	
Cuadro 18. Cambio de masa de las muestras en el estacionamiento km 47+000	72
Cuadro 19. Cambio de masa de las muestras en el estacionamiento km 48+000	73
Cuadro 20. Descripción microscópica de las muestras de concreto lanzado, en su estado final.....	74
Cuadro 21. Concentración de elementos del espectro elemental de acuerdo a la Figura 29.....	77

Cuadro 22. Descripciones de las muestras de concreto lanzado sumergido en disolución ácida con valor pH 2 y pH 4.	81
Cuadro 23. Descripción microscópica de las muestras de concreto lanzado inmersas en disolución ácida en el Ciclo Continuo	84
Cuadro 24. Descripciones de las muestras de brecha volcánica sumergido en disolución con valor pH 2 y pH 4.....	87
Cuadro 25. Descripción microscópica de la muestra de brecha volcánica expuestas a disolución con pH 2 y pH 4.	90
Cuadro 26. Descripciones de las muestras de andesita sumergido en disolución con valor pH 2 y pH 4.....	93
Cuadro 27. Medidas y observaciones del ensayo de Ciclo Alternado con una disolución ácida de pH 2.	99
Cuadro 28. Medidas y observaciones de la muestra de brecha volcánica en el ensayo de Ciclo Alternado con una disolución ácida de pH 2.....	105
Cuadro 29. Descripción microscópica de la muestra de brecha volcánica expuesta a disolución con pH 2.....	107
Cuadro 30. Medidas y observaciones de la muestra de andesita en el ensayo de Ciclo Alternado con una disolución ácida de pH 2.	108
Cuadro 31. Medidas y observaciones del ensayo de Ciclo Alternado con una disolución ácida de pH 4.	115
Cuadro 32. Descripción mineralógica de la muestra de concreto lanzado, inmersa en disolución pH 4.....	117
Cuadro 33. Medidas y observaciones de la muestra de brecha volcánica en el ensayo de Ciclo Alternado con una disolución ácida de pH 4.....	118
Cuadro 34. Descripción mineralógica de la muestra de brecha volcánica, inmersa en disolución pH 4.....	119
Cuadro 35. Medidas y observaciones de la andesita en el ensayo de Ciclo Alternado con una disolución ácida de pH 4.	121
Cuadro 36. Medidas y observaciones del concreto lanzado en el Ciclo Alternado con una disolución ácida de pH 5,5.	126
Cuadro 37. Descripción mineralógica de la muestra de concreto lanzado, inmersa en disolución pH 5,5.....	128
Cuadro 38. Medidas y observaciones en la brecha volcánica del ensayo de Ciclo Alternado con una disolución ácida de pH 5,5.	129

Cuadro 39. Descripción mineralógica de la muestra de brecha volcánica, inmersa en disolución pH 5,5.....	130
Cuadro 40. Medidas y observaciones de la andesita en el ensayo de Ciclo Alternado con una disolución ácida de pH 5,5.	132
Cuadro 41. Cambios de masa y descripciones de las muestras colocadas bajo un flujo constante de DAR <i>in situ</i>	135
Cuadro 42. Comparación de cambio de masa y volumen, según tipo de ensayo.	147

Índice de Figuras

Figura 1. Esquema de las tres condiciones durante la evolución microestructural del yeso en los poros del concreto. a) Depositación inicial del yeso. b) El yeso rellena por completo el poro, hay presión interna. c) El yeso provoca agrietamiento del poro para liberar la presión. (Modificado de: Yuan, 2013).....	20
Figura 2. A) y B) Microfotografías de etringita e hidróxidos de calcio. (Fuente: Ramírez, 2008). C) Fotografía de sección delgada de etringita que se forma en el borde del agregado, con un espesor de 0,4 mm. (Modificado de: Poole & Sims, 2015).....	25
Figura 3. Cristales de etringita y su respectivo espectro elemental con un concentraciones de calcio, azufre y aluminio principalmente. (Fuente: Poole & Sims, 2015).....	26
Figura 4. A) Talud derecho del estacionamiento km 38+600, pared recubierta por concreto lanzado y una malla de control de erosión en el sitio donde ya se ha presentado un desprendimiento del concreto lanzado. B) Berma del talud derecho, que presenta presencia de DAR y caída de bloques. C) Desgaste en la matriz del concreto de la cuneta.....	30
Figura 5. Degaste del concreto lanzado al pie del talud derecho del km 38+600. Se observa la erosión de finos.	32
Figura 6. Talud izquierdo del km 38+600, erosión y desgaste en el talud que afectó la malla.....	33
Figura 7. Talud izquierdo, estacionamiento km 47+000.....	36
Figura 8. A) Terraza del talud izquierdo del km 48+000. B) Se observan las patinas de óxidos formados en el suelo.....	38
Figura 9. Diagrama de flujo con la metodología de trabajo para la realización de esta investigación.....	39
Figura 10. Diagrama de flujo de la metodología del ensayo para caracterizar el efecto del DAR en concreto lanzado y rocas sanas.....	40
Figura 11. A) Proyección de concreto por parte de la empresa Geointer. B) paneles de concreto lanzado finalizados.	42
Figura 12. A) Extractor de núcleos, HILTI DD130 con broca de 2 pulgadas. B) Núcleos extraídos del panel con diferentes longitudes.	43
Figura 13. Afloramiento de roca en el kilómetro 48+000.....	44
Figura 14. A) Afloramiento de brecha volcánica, en el estacionamiento km 39+000, ubicado en el margen derecho. B) Extractor de núcleos en el sitio. C) Núcleos previamente cortados a 9 cm de longitud y con su código respectivo.	46

Figura 15. A) Fotografía área del estacionamiento km 38+600. B) Sitio de dos muestras en el talud derecho. C) Sitio de dos muestras en el talud izquierdo Los puntos rojos son los sitios donde se enterraron las muestras.....	50
Figura 16. A) Fotografía área del estacionamiento km 47+000. B) Sitio de colocación de dos muestras en el talud izquierdo. C) Proceso de colocación de muestras. Los puntos rojos son los sitios donde se enterraron las muestras.	52
Figura 17. Zona de encharcamiento donde se acumula agua ácida, colores intensos y fuerte olor a azufre, con pH 2,23. Estacionamiento del km 48+000.....	53
Figura 18. A) Fotografía área del estacionamiento km 48+000. B) Sitio de colocación de muestras en el talud izquierdo. C) Proceso de colocación de muestras. Los puntos rojos son los sitios donde se enterraron las muestras.	54
Figura 19. Recipientes con disolución ácida con pH 2 y sus respectivas muestras.	55
Figura 20. Muestras de concreto lanzado y roca, listas para ser introducidas al horno industrial.....	58
Figura 21. A) Sitio de colocación de muestras en el talud derecho estacionamiento km 38+600. B) Sitio de colocación de muestras en el talud derecho estacionamiento km 45+000.	60
Figura 22. Ensayo de flujo de DAR. Bomba subacuática para simular la precipitación constante.	61
Figura 23. Fotografías de sección delgada del concreto lanzado en estado inicial. A) Nicoles paralelos. B) Nicoles cruzados	63
Figura 24. Microfotografías de la muestra de concreto lanzado en estado inicial. A) Poros micrométricos en la matriz en la muestra, aumento x25. B) Se observa el concreto lanzado a un aumento de x2.00K.	64
Figura 25. Fotografías de sección delgada de la muestra de brecha volcánica en estado inicial. A) Nicoles paralelos. B) Nicoles cruzados.....	65
Figura 26. A) Microfotografía a un aumento de 100x, se observa micro-fracturas en la matriz. B) Arcilla relleno de los espacios entre los clastos, aumento x3.20k....	66
Figura 27. Fotografías de sección delgada de la muestra de andesita en estado inicial. A) Nicoles paralelos. B) Nicoles cruzados.....	68
Figura 28. A) Microfotografía con aumento de x700. B) Microfotografía con aumento x2k con cristales xenomórficos, planares, sin matriz aparente.	69
Figura 29. Microfotografía de la matriz en tres sitios diferentes. Los círculos de color rojo limitan el área del espectro elemental. A) Aumento de 33x, B) Aumento	

de 180x. C) Aumento de 290x, de una muestra del ensayo <i>In Situ</i> del estacionamiento km 48+000.	76
Figura 30. Se observó la formación de cristales prismáticos de yeso y etringita en los bordes de los agregados.	77
Figura 31. Información de cambio de masa del ensayo Ciclo Continuo.....	79
Figura 32. Cambios diarios en el valor de pH de la disolución en contacto con las muestras de concreto lanzado en el ensayo de Ciclo Continuo. A) Disolución con pH 2. B) Disolución con pH 4.	83
Figura 33. Fotografías de sección delgada de muestras de concreto en el Ciclo Continuo inmerso en disolución con pH 2. A) Nicoles paralelos. B) Nicoles cruzados.	84
Figura 34. Fotografías de sección delgada de muestras de concreto en el Ciclo Continuo inmerso en disolución con pH 4. A) Nicoles paralelos. B) Nicoles cruzados.	85
Figura 35. Microfotografías del concreto lanzado expuesto a disolución pH 2. A) Textura superficial, con su respectivo espectro elemental, aumento de 80X. B) Cristales etringita, dentro de poros y bordeando los agregados, aumento de x1.20k	86
Figura 36 Cambios diarios en el valor de pH de la disolución en contacto con las muestras de brecha volcánica en el ensayo de Ciclo Continuo. A) Disolución con pH 2. B) Disolución con pH 4.	89
Figura 37. Fotografías de sección delgada de muestras de brecha en el Ciclo Continuo inmerso en disolución con pH 2. A) Nicoles paralelos. B) Nicoles cruzados.	90
Figura 38. Fotografías de sección delgada de muestras de brecha en el Ciclo Continuo inmerso en disolución con pH 4. A) Nicoles paralelos. B) Nicoles cruzados.	91
Figura 39. Microfotografías. A) Aumento de 100X, textura superficial, con su respectivo espectro elemental B) Aumento de 100X, micro-fracturas de la matriz.	92
Figura 40. Cambios diarios en el valor de pH de la disolución en contacto con las muestras de andesita en el ensayo de Ciclo Continuo. A) Disolución con pH 2. B) Disolución con pH 4.	94
Figura 41. Línea cronológica con división de ciclos y etapas para el ensayo del Ciclo Alternado.....	95
Figura 42. Información sobre cambio de masa para los tres tipos de muestra inmersas en disolución ácida con pH 2, en el ensayo Ciclo Alternado.	97

Figura 43. A) Cristalización de yeso en la superficie de la muestra de concreto lanzado, en el ciclo 3. B) Cambio de las dimensiones del diámetro superior, por la degradación del material y formación de la pátina, en el ciclo 4.	101
Figura 44. Cambios en el valor de pH 2 de la disolución en contacto con las muestras de concreto lanzado en el ensayo de Ciclo Alternado.....	103
Figura 45. A) Análisis espectral de dos sitios de la muestra. B) Microfotografías de cristales de etringita. C) Fotografías de las secciones delgadas de una de las muestra de concreto lanzado.	104
Figura 46. Cambios en el valor de pH 2 de la disolución en contacto con las muestras de brecha volcánica en el ensayo de Ciclo Alternado.	106
Figura 47. Fotografías de sección delgada de muestras de brecha en el Ciclo Alternado inmerso en disolución con pH 2. A) Nícoles paralelos. B) Nícoles cruzados.	107
Figura 48. Cambios en el valor de pH 2 de la disolución en contacto con las muestras de andesita en el ensayo de Ciclo Alternado.	109
Figura 49. A) Microfotografías y espectro elemental en tres sitios marcados con círculos rojos, de la muestra de andesita. B) Fotografías de las secciones delgadas.	110
Figura 50. Cambios en el valor de pH de la disolución en contacto con las muestras en el ensayo de Ciclo Alternado. A) Muestra de concreto lanzado. B) Muestra de brecha volcánica. C) Muestra de andesita.	112
Figura 51. Información sobre el cambio de masa para los tres tipos de muestra inmersas en disolución ácida con pH 4, en el ensayo Ciclo Alternado.	114
Figura 52. Cambios en el valor de pH 4 de la disolución en contacto con las muestras de concreto lanzado en el ensayo de Ciclo Alternado.....	116
Figura 53. Fotografías de sección delgada de muestra de concreto lanzado en el Ciclo Alternado inmerso en disolución con pH 4. A) Nícoles paralelos. B) Nícoles cruzados.	117
Figura 54. Cambios en el valor de pH 4 de la disolución en contacto con las muestras de brecha volcánica en el ensayo de Ciclo Alternado.	119
Figura 55. Fotografías de sección delgada de la muestra de brecha volcánica en el Ciclo Alternado inmerso en disolución con pH 4. A) Nícoles paralelos. B) Nícoles cruzados.	120
Figura 56. Cambios en el valor de pH 4 de la disolución en contacto con las muestras de brecha volcánica en el ensayo de Ciclo Alternado.	122

Figura 57. Cambios en el valor de pH de la disolución en contacto con las muestras en el ensayo de Ciclo Alternado. A) Muestra de concreto lanzado. B) Muestra de brecha volcánica. C) Muestra de andesita.	123
Figura 58. Información sobre el cambio de masa para los tres tipos de muestra inmersas en disolución ácida con pH 5,5, en el ensayo Ciclo Alternado.	125
Figura 59. Cambios en el valor de pH 5,5 de la disolución en contacto con las muestras de concreto lanzado en el ensayo de Ciclo Alternado.....	127
Figura 60. Fotografías de sección delgada de muestras de concreto lanzado en el Ciclo Alternado inmerso en disolución con pH 5,5. A) Nicoles paralelos. B) Nicoles cruzados.	128
Figura 61. Cambios en el valor de pH 5,5 de la disolución en contacto con las muestras de brecha volcánica en el ensayo de Ciclo Alternado.	130
Figura 62. Fotografías de sección delgada de muestras de brecha volcánica en el Ciclo Alternado inmerso en disolución con pH 5,5. A) Nicoles paralelos. B) Nicoles cruzados.	131
Figura 63. Cambios en el valor de pH 5,5 de la disolución en contacto con las muestras de andesita en el ensayo de Ciclo Alternado.	133
Figura 64. Cambios en el valor de pH de la disolución en contacto con las muestras en el ensayo de Ciclo Alternado. A) Muestra de concreto lanzado. B) Muestra de brecha volcánica. C) Muestra de andesita.	134
Figura 65. A) La muestra izquierda es concreto lanzado y la derecha es brecha volcánica. B) La muestra izquierda es concreto lanzado y la derecha es andesita.	136
Figura 66. Muestra de las tres muestras expuestas cada una con su valor respectivo de pH.	139
Figura 67. Muestra expuesta un flujo constante de disolución acida con pH 2, por un periodo de 11 semanas.....	140
Figura 68. Depósitos de yeso y etringita en cunetas del talud derecho del estacionamiento km 38+600	144

Resumen

La Escuela Centroamericana de Geología en conjunto con el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales ambos de la Universidad de Costa Rica, han realizado trabajos cualitativos sobre los efectos del drenaje ácido de roca (DAR) en los materiales utilizados para la estabilización y control de erosión en los taludes (km 38+600, km 45+000, km 47+000 y el km 48+000) en la ruta nacional No. 27 (RN-27). El presente estudio desarrolló una metodología para recrear y medir el impacto que tiene el drenaje ácido en el macizo rocoso y en el concreto de tipo lanzado de los taludes, mediante experimentos en el laboratorio y en campo.

El Instituto Costarricense de Electricidad, ha realizado también análisis sobre el efecto de las aguas ácidas en el concreto, específicamente en la construcción de proyectos hidroeléctricos. Sin embargo, este estudio es el primero en el país enfocado en taludes de carretera, que utilizan concreto lanzado para su estabilización.

El drenaje ácido son aguas acidificadas consecuencia de la oxidación de minerales metálicos ricos en azufre. Estas aguas al escurrir entre los materiales del talud, provocan cambios físicos y mineralógicos en la composición original de estos y pueden ocasionar inestabilidad.

La importancia de este estudio está en el aporte de una metodología para futuros trabajos sobre materiales expuestos a condiciones similares en otras rutas nacionales y para el apoyo de la toma de decisiones correspondientes a la estabilización de taludes afectados por este proceso.

La hipótesis planteada indica que si las rocas sanas que afloran en las inmediaciones de la RN-27 y el concreto lanzado diseñado y proyectado con las mismas especificaciones del que fue colocado en los taludes, son expuestas a disoluciones ácidas que simulan el DAR, entonces se darán cambios en sus propiedades físicas y mineralógicas que afecten sus características originales. Pero si el material utilizado no tiene componente calcáreo este no reaccionará con el ácido y no se producirán cambios. Esta hipótesis si se cumplió y así a partir de este estudio, existen suficientes evidencias que justifiquen no utilizar el concreto lanzado en sitios donde se da el DAR.

Se realizaron cinco ensayos diferentes, tres en laboratorio y dos en campo, con muestras de brecha volcánica, andesita y concreto lanzado, de las cuales las dos primeras fueron obtenidas en campo y el último fue construido con el mismo diseño de mezcla del colocado en el sitio. Se analizaron los cambios de la masa, dimensiones y las características mineralógicas mediante microscopía óptica y dispersión de rayos X.

Los resultados evidenciaron que las muestras expuestas a un alto nivel de acidez ($\text{pH} \leq 2$), tienen un mayor impacto en sus características, que las que están en contacto con una disolución de menor acidez ($2,0 \leq \text{pH} \leq 5,5$). El concreto lanzado es el material más susceptible, de todos los ensayados, al ataque de la disolución ácida generando como producto mineralógico de la reacción, yeso y etringita. Las muestras de brecha volcánica se ven afectadas solamente por la disolución de los carbonatos en los clastos y vetillas, y la andesita al carecer de componente calcáreo en su composición, no evidenció alteraciones en el laboratorio. De las propiedades físicas consideradas y analizadas, la masa presentó los cambios más significativos mientras que en las dimensiones no se reflejaron cambios considerables.

Se demostró, tanto en campo como en el laboratorio, a que la exposición del concreto lanzado disoluciones ácidas generó cambios en sus propiedades físicas y mineralógicas a nivel macro y microscópico. Esto implica el deterioro en la calidad del concreto y explica los problemas de estabilidad y colapso de este material en la RN-27. De acuerdo con los resultados en laboratorio y en campo, se valida el experimento acelerado en laboratorio y se comprueba la hipótesis de trabajo.

Palabras claves:

Ácido sulfúrico, concreto lanzado, drenaje ácido, experimentos, ruta nacional No.27, rocas sanas, taludes.

Abreviaturas

DAR: Drenaje Ácido de Roca

pH: Potencial hidronio

RN-27: Ruta Nacional N°27

ICE: Instituto Nacional de Electricidad

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

IGN: Instituto Geográfico Nacional

MEB: Microscopio Electrónico de Barrido

EDX: *Energy-dispersive X-ray*

ASTM: *American Society for Testing and Materials*

s.n.m.: sobre el nivel del mar

CAPÍTULO I

1. Introducción

Esta tesis de graduación 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 Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), el cual es una dependencia de la Universidad de Costa Rica especializada en materiales, estructuras e infraestructura del transporte. 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.

El término Drenaje Ácido de Rocas (DAR) hace referencia a la acidificación de las aguas naturales como consecuencia de la descomposición por oxidación de rocas que contienen minerales metálicos ricos en azufre o sulfuros (p.ej., pirita, arsenopirita, marcasita, calcopirita, esfalerita y galena, entre otros). Estos tienden a oxidarse al estar expuestos a los agentes naturales como el agua y el aire. Durante el proceso de oxidación del mineral, se libera azufre, el cual se combina con el agua y el oxígeno del aire para formar ácido sulfúrico. Al mismo tiempo, se liberan metales, los cuales pueden incorporarse al agua (USEPA, 1994; Grandia et al., 2009 & Dold, 2010).

Este proceso está caracterizado por tener pH bajo, frecuentemente los materiales presentan un color café rojizo atribuido al ión Fe^3 y cuando el escurrimiento de drenaje ácido es aireado, se forman manchas café rojizas en los cauces y canales de drenaje. Por lo tanto, el DAR, es un proceso de generación de aguas ácidas

producto de la oxidación de rocas, principalmente oxidación de sulfuros, en cualquier ambiente (Sernageomin, 2002).

En Costa Rica, se han realizado diversos estudios de manera descriptiva y cualitativa sobre los efectos del DAR en los materiales utilizados en las estructuras para estabilizar los taludes en la RN-27 y en obras de construcción de proyectos hidroeléctricos (Vargas & Fernández, 2002; Ruiz et al., 2015a, 2015b, 2015c; Com. Oral Ignacio Arguedas, 2017).

Este estudio pretende desarrollar una metodología que permita determinar los cambios provocados por el efecto del DAR de manera cuantitativa, en las propiedades de la roca sana aflorante y en el concreto lanzado que es utilizado comúnmente para la estabilización de taludes de la RN-27.

1.1 Problema

La Ruta Nacional N°27 (RN-27) fue construida con el propósito de comunicar al Valle Central con la costa pacífica y mejorar el dinamismo económico del país. Estudios de la Escuela Centroamericana de Geología en conjunto con LanammeUCR, han demostrado el impacto negativo en algunos de los taludes de la RN-27, que están relacionados con la generación de DAR (Ruiz, 2015; Ruiz et al., 2015a, 2015b, 2015c)

El DAR aunado a otros factores, como la elevada pendiente en los taludes, rocas alteradas hidrotermalmente y sistemas de manejo de aguas superficiales ineficientes (ACG, 2010; Porrás et al., 2012; Valverde et al., 2014) comprometen la estabilidad de los cortes de la carretera, observándose que en algunos sitios las soluciones geotécnicas no siempre corresponden con las características físicas y mineralógicas del suelo y de las rocas.

Según Ruiz et al. (2015a, 2015b, 2015c) las principales zonas de la RN-27 donde hay presencia de DAR son los estacionamientos de los kilómetros 38+600, 45+300, 47+000 y el 48+000. Estudios realizados por el LanammeUCR indican que el sistema de protección recubierto con concreto lanzado, está deteriorado con agrietamiento intenso. Esto evidencia que el DAR afecta los materiales de las estructuras relacionadas con la carretera, tales como las paredes de concreto, las varillas de acero y las cunetas, lo que provoca una pérdida de la matriz cementante y cuyos efectos disminuyen la durabilidad y la calidad del concreto.

Después de una exhaustiva revisión bibliográfica, se hallaron diferentes métodos que miden el impacto del DAR en concreto. Sin embargo, no se encontraron protocolos estandarizados, en Costa Rica ni en otros países para realizarlos en roca sana. Los ensayos recopilados, tienen la limitante que se pueden extender por varios años y ninguno estudia el efecto en roca sana, por lo tanto, el estudio se basó en el ensayo de Attiogbe & Rizkalla (1988) que tiene un tiempo razonable y condiciones pueden recrear un ambiente tropical, similar a lo que se presenta en Costa Rica. El autor indica que el uso de disoluciones ácidas frescas y muestras de menor tamaño, provee una evaluación acelerada de la resistencia de los materiales al ácido. En el Cuadro 1, en la sección de Marco Teórico se presenta una síntesis de los métodos encontrados.

1.2 Justificación

Estudios previos han comprobado la presencia de DAR en los taludes de cuatro estacionamientos de la RN-27 (38+600, 45+300, 47+000, 48+000 km), donde se observan fracturas, degradación severa de los macizos rocosos y de las paredes de concreto lanzado, pátinas rojizas y anaranjadas; y acumulación de aguas ácidas con tonalidades rojizas (Ruiz, 2015; Ruiz et al., 2015, 2015b, 2015c). Este proceso genera problemas de estabilidad por el deterioro de los materiales, que son

sometidos a cambios en sus características físicas y mineralógicas, impactando negativamente su función mecánica y estructural.

La RN-27 es una carretera concesionada, que informes previos de diferentes entidades tanto fiscalizadoras como fiscalizadas (ACG, 2010; Valverde et al., 2014; Ruiz, 2015; Ruiz et al., 2015a, 2015b, 2015c; CNC-APM-SJO-OF-086, 2016) se han referido al deterioro y la formación de grietas en las paredes de concreto lanzado que recubren los taludes, como una consecuencia del proceso del DAR. Sin embargo, hay una discusión sobre si este es el único causante o si hay otros factores que incidan de forma más inmediata en el deterioro. La concesionaria indica que “no está claro el efecto del hidrotermalismo en el concreto armado y que no se ha determinado que este fenómeno haya afectado las características de resistencia del concreto, ni verificado que el DAR haya causado modificaciones en los espesores de concreto lanzado o bien que haya modificado el peso unitario típico de este material”.

Por lo tanto, en este estudio se desarrolla una metodología que caracterice y cuantifique el efecto del DAR, en rocas sanas y el concreto lanzado, mediante mediciones de cambios de masa, dimensionales y mineralógicos en las diferentes rocas que conforman los macizos rocosos que están expuestos en los cortes de la carretera y en los materiales de las estructuras de concreto usadas para contención de los taludes y que sean la base de estudios futuros sobre el impacto del DAR en diferentes materiales.

1.3 Alcances y limitaciones

Alcances

- Se trabajó específicamente en los taludes de los estacionamientos km 38+600, km 47+000 y km 48+000.
- Se utilizó el ácido sulfúrico para la preparación de las disoluciones acuosas porque se ha demostrado que este ácido es el que generan las rocas aflorantes de la zona. Para los ensayos de laboratorio, se utilizaron los valores de pH $2,0\pm 0,5$, pH $4,0\pm 0,5$ y pH $5,5\pm 0,5$. Estos son valores representativos de las condiciones actuales en la RN-27 y el valor de pH 5,5 es similar al de la lluvia ácida.
- Los materiales utilizados son muestras de concreto diseñado y proyectado con las mismas características del que recubre los taludes de la RN-27 y muestras de brecha volcánica y andesita que afloran en los estacionamientos km 39+000 y km 48+000, respectivamente.
- Los ensayos en el laboratorio y en el campo, se limitaron a la metodología descrita en el capítulo 3. Las características físicas consideradas para el análisis son la masa y las dimensiones.
- Para las características mineralógicas se consideraron las alteraciones que se presentaban en las muestras posterior al ensayo.

Limitantes

- Para efectos de este estudio, las muestras de roca que fueron sustraídas de un sitio del talud sin presencia de DAR y se consideran rocas sanas, a pesar de que presenten alguna alteración previa por su formación o tiempo de exposición. De igual manera las muestras de concreto lanzado se consideran sanas, a partir de su extracción para la obtención del núcleo.

- Por los alcances del presente trabajo y de las funciones de evaluación y fiscalización no vinculante que por Ley de la República tiene LanammeUCR, le corresponde a otra institución o laboratorio plantear soluciones específicas para la resolución del problema.

1.4 Importancia de este estudio

El DAR es un proceso comúnmente conocido en las actividades mineras, producto de la exposición a la intemperie de ciertos tipos de roca con minerales que tienen alto contenido de azufre; este proceso puede ocurrir también en cortes de carreteras. En este último tema hay pocos estudios y ensayos a nivel mundial registrados que se puedan reproducir (ver Cuadro 1) los distintos tipos de ensayos del DAR en concreto, tanto en el deterioro de taludes de carretera como en los materiales de alcantarillado.

Con los insumos bibliográficos de pruebas con DAR en los diferentes tipos de concretos, y específicamente Attiogbe & Rizkalla (1988); se formulan las bases para el desarrollo de la metodología de este estudio, para determinar y cuantificar el efecto del DAR en las rocas sanas y el concreto lanzado, expuestos a ambientes con condiciones tropicales. El ensayo en roca sana proporciona información del impacto en taludes que no están recubiertos con concreto.

En Costa Rica, el LanammeUCR ha elaborado investigaciones sobre el DAR relacionados a los taludes de carreteras (Ruiz et al., 2015a, 2015b, 2015c) y el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) ha estudiado el efecto del DAR en diferentes tipos de concreto para el proyecto hidroeléctrico Río Toro III.

Esta investigación es un aporte para estudios posteriores en el tema de la red vial en la RN-27; en otros sitios del país y sobre materiales resistentes al DAR; para la toma de decisiones correspondientes a la estabilización de taludes afectados por este proceso, reducir el riesgo de la caída de materiales sobre la carretera y velar por la seguridad de los usuarios.

1.5 Hipótesis de trabajo

Si las rocas sanas que afloran en las inmediaciones de la RN-27 y el concreto lanzado diseñado y proyectado con las mismas especificaciones del que fue colocado en los taludes, son expuestas a disoluciones ácidas que simulan el DAR, entonces se darán cambios en sus propiedades físicas y mineralógicas que afecten sus características originales. Pero si el material utilizado no tiene componente calcáreo este no reaccionará con el ácido y no se producirán cambios.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Desarrollar una metodología para la medición del efecto que tiene el DAR en las rocas aflorantes de los taludes de la ruta nacional No. 27 y en el concreto tipo lanzado que se utiliza para la estabilización de los taludes de esa misma ruta, mediante pruebas en el laboratorio y pruebas *in situ*.

1.6.2 Objetivos específicos

- Analizar los cambios de la masa y dimensiones de las muestras de roca y del concreto, tanto en el laboratorio como en el sitio elegido en el campo, para la cuantificación del efecto del DAR en un tiempo determinado.
- Describir las características mineralógicas de la roca y del concreto lanzado, en microscopía para el análisis del efecto del DAR en sus componentes.
- Evaluar la metodología desarrollada del efecto del DAR en roca sana y concreto lanzado comparando los resultados del laboratorio y del campo para validarla.

1.7 Ubicación de la zona de estudio

El área de estudio se extiende en el cuadrante entre las coordenadas 447000-457000E y 1096500-1099600N según la proyección CRTM-2005 de la hoja topográfica Río Grande del Instituto Geográfico Nacional (IGN) escala 1:25000. Está ubicada entre las localidades de Balsa (cercañas del distrito de Turrúcares de Alajuela) y Hacienda Vieja (cercañas de Orotina) sobre la RN-27, en el tramo entre los estacionamientos de los kilómetros 37+000 y 48+000, 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 promedio de la zona está en el ámbito entre 200 m s.n.m. y 460 m s.n.m.

Según la clasificación de zonas de vida de Holdridge para Costa Rica (Holdridge, 1967), la zona de estudio corresponde a un Bosque Húmedo Tropical (bh-T) donde las temperaturas superan los 24 °C la mayor parte del año, con un promedio anual de lluvia entre 1800 mm y 4000 mm, y presenta una estación seca bien marcada que puede extenderse hasta por cinco o seis meses, usualmente entre diciembre y mayo.

1.8 Definición de zona de estudio y sitios de interés

Después de la revisión bibliográfica, se realizó la corroboración en campo para reconocer los taludes recubiertos por concreto lanzado que tenían evidencias de DAR, y documentar su ubicación y estado de deterioro. Se detectaron tres estacionamientos (km 38+600, km 47+000 y el km 48+000) con características importantes, que de acuerdo con estudios anteriores (Ruiz, 2015; Ruiz et al., 2015a, 2015b, 2015c) se ha confirmado la presencia del DAR. Para efectos de ubicación de taludes en la descripción de la metodología, se considera talud derecho o talud izquierdo con referencia a la vía en sentido San José – Caldera.

CAPÍTULO II

2. Marco teórico

En este capítulo se desarrolla la temática de drenaje ácido y el impacto que genera en las estructuras cuando están en contacto con este, tanto en sus características físicas, químicas y mineralógicas.

2.1 Concreto y sus efectos

El concreto se define como una la mezcla que al endurecerse forma un compacto capaz de soportar altos esfuerzos de compresión; la mezcla se compone de material aglutinante (cemento Portland hidráulico), del relleno (agregados o áridos), de agua y algunos aditivos (Sánchez, 2001).

Comúnmente para el diseño del concreto se utiliza cemento Portland hidráulico, el cual tiene propiedades tanto adhesivas como cohesivas, que dan la capacidad de aglutinar los agregados o áridos para conformar el concreto (Sánchez, 2001). El cemento Portland hidráulico se compone de un conglomerado formado a partir de una mezcla de caliza y arcillas calcinadas – el *clinker*- que se convierte en cemento cuando se agrega yeso el cual aporta las propiedades adecuadas para fraguar y endurecerse (Ruiz, 2006).

El agua hidrata las partículas de cemento y promueve que se desarrollen sus propiedades aglutinantes. Al mezclar el agua con el cemento se produce una pasta, más o menos diluida, dependiendo de la cantidad que se le agregue. Cuando se endurece la pasta, una parte del agua queda fija en su estructura y el resto se evapora (Ruiz, 2006).

El término pasta se refiere a la mezcla de cemento, agua y aire, junto con aditivos añadidos. Esta pasta reduce la permeabilidad del concreto, ya que rellena los espacios entre las partículas y evita el paso del agua dentro de la masa endurecida, lo cual es crítico en estructuras hidráulicas o en concretos que estén expuestos a la acción de aguas agresivas que eventualmente degradan la estructura de la masa haciendo perder resistencia (Sánchez, 2001), como con el caso de las aguas ácidas.

Entre los efectos que podrían causar las aguas ácidas al concreto, está la pérdida de resistencia, la pérdida de estabilidad por la reducción de la cohesión y la corrosión del acero de refuerzo. Además cuando ocurre la lixiviación de los concretos, se produce un incremento de la permeabilidad que aumenta la infiltración y los sólidos disueltos en el agua (Vargas & Fernández, 2002).

Los agregados en combinación con la pasta fraguada proporcionan parte de la resistencia mecánica a la compresión característica del concreto, debido a que éstos tienen una resistencia propia que aporta al concreto como masa endurecida (Sánchez, 2001).

Estos agregados pétreos (grava y arena), son de diferentes orígenes según el tipo de roca que se utilice (rocas ígneas o sedimentarias). En el caso de Costa Rica, las rocas ígneas usualmente son volcánicas y contienen minerales cálcicos (plagioclasas, zeolitas) dentro de su estructura. El calcio, al ser meteorizado, forma calcita en minerales como las plagioclasas. Si el agregado es de origen sedimentario clástico o bioquímico, el cemento de la matriz de estas rocas es carbonatado (Ruiz, 2006).

De acuerdo con Sánchez (2001), el concreto ofrece - como las rocas - una resistencia elevada a los esfuerzos de compresión que contrasta con una escasa resistencia a la tracción. Este es el motivo por el que debe ser reforzado con varillas de acero en las zonas de tracción para suplir esta deficiencia, teniendo una pieza resistente a la flexión.

Las propiedades del concreto se estudian con la finalidad de determinar el diseño de la mezcla. Los factores básicos a tomar en cuenta para el diseño son: los costos económicos, la facilidad de colocación y de consolidación, la velocidad del fraguado, la resistencia, la durabilidad, la impermeabilidad, el peso unitario, la estabilidad del volumen y la apariencia adecuada (Sánchez, 2001).

Un tipo de concreto versátil para el uso en estabilización de estructuras es el concreto lanzado, que se define como un mortero o concreto transportado a través de una manguera y proyectado neumáticamente a alta velocidad sobre una superficie. Si la mezcla cuenta sólo con agregados finos, se le llama mortero lanzado, y si los agregados son gruesos se le denomina concreto lanzado; el cual generalmente contiene una mayor cantidad de agregados finos y de cemento que un concreto tradicional, por lo cual su porosidad es menor. Si además la relación agua/cemento es menor y la compacidad elevada, se crean poros bajo forma de inclusiones de aire que no se comunican entre sí (Sánchez, 2001).

Para efecto de la estabilidad de taludes en las estructuras de la RN-27, el concreto utilizado es el concreto lanzado proyectado por vía húmeda, como principal método de estabilización de los macizos rocosos, y es impactado directamente por procesos de alteración característicos presentes en la zona de colocación, como lo es el DAR.

Según Kerkhoff (2007), con un drenaje levemente ácido de pH 6,5, ya se manifiestan algunos efectos en el concreto como la desintegración lenta del

cemento y la erosión de la superficie; esta desintegración aumenta a medida que el pH disminuye. El deterioro del concreto consiste en la formación de minerales como yeso y etringita, los cuales inciden en la disminución de la resistencia compresiva, en la pérdida de masa y el aumento del volumen del material.

El contacto con los sulfatos originados como consecuencia de la descomposición por oxidación de rocas que contienen minerales metálicos ricos en azufre o sulfuros (p.ej., pirita, arsenopirita, marcasita, calcopirita y esfalerita, entre otros) (Ruiz et al, 2015), baja la resistencia del concreto debido a la reacción con el aluminato tricálcico para formar el sulfoaluminato de calcio, el cual tiene un volumen mayor (menor densidad) que el de los componentes que los originan. La consecuencia de este aumento de volumen, es la aparición de esfuerzos intersticiales que desintegran el concreto. El concreto es más vulnerable cuando se encuentra con sustancias químicas en disolución acuosa, ya que el agua ejerce presión hidrostática sobre las superficies internas y algunas sustancias podrían favorecer las reacciones químicas que dañan el concreto (Sánchez, 2001).

Por lo tanto, la exposición del concreto al DAR, causa que los componentes del cemento se rompan y que provoquen lixiviación con cualquier agregado de carbonato, aumentando la porosidad y la permeabilidad. Si el DAR se profundiza hasta el acero reforzado por medio de las fracturas y poros de la estructura de concreto, ocurre la corrosión del acero lo que podría provocar fracturas y la caída del concreto, por el deterioro de su refuerzo (Vargas & Fernández, 2002; Kerkhoff, 2007).

Los efectos del DAR en estructuras de concreto, incluyen la degradación de la calidad del agua superficial, la desintegración de los materiales de construcción y el daño estructural en los edificios, debido a la pérdida de fuerza en la matriz por la degradación del silicato cálcico hidratado y a la expansión volumétrica por la

formación de componentes expansivos que induce el agrietamiento. Esta pérdida de fuerza se relaciona con la descalcificación de los hidratos de cemento por el descenso del pH (Orndorff, 2001; Tixier 2003). El concreto también es expuesto al DAR, con las aguas de las minas y con algunas aguas de desechos industriales o domésticas, las cuales tienen pH bajos. El ácido sulfúrico es el ácido que reacciona más rápido con el concreto a temperatura ambiente (Sánchez, 2001).

Según Sánchez (2001), en el caso del concreto no existe una defensa total contra los ácidos, por lo que estrictamente, el concreto debe ser aislado de ellos mediante algún tipo de barrera impermeable y resistente al ácido que lo proteja. Una opción para alargar el tiempo de deterioro es agregar aditivos especiales con ese fin.

En Costa Rica las dos principales empresas productoras de cemento son Cemex y Holcim. Cada una de ellas tiene su fuente de materiales calizos y distribución de plantas generadoras de cemento por todo el país (Ruiz, 2006). Las sedes de operaciones de Cemex en Costa Rica se componen en general de tres plantas cementeras, seis concreteras distribuidas en todo el país y un centro de distribución.

En Cemex para la fabricación de cemento se usa una matriz calcárea o arcillosa. Para el componente calcáreo se utilizan solamente calizas, extraídas de las rocas carbonatadas de la formación Barra Honda, en Colorado de Abangares, del cerro Peña Blanca. Estas calizas son de una pureza adecuada y con un alto contenido de carbonato de calcio (mayor a 90%). Para el componente arcilloso se usan arcillas del grupo de la caolinita y de la esmectita (montmorillonita) que aportan sílice, el aluminio y los óxidos de hierro a la mezcla. En esa misma planta - en Colorado de Abangares - para la fabricación de *clinker* se utilizan lutitas y areniscas finas de la formación Descartes como componente arcilloso dentro del formulado.

La empresa Holcim, explota las calizas de la formación de San Miguel en Cartago y

la formación las Ánimas en Turrialba. Dichas calizas contienen una concentración de carbonato de calcio que oscila entre 92 % - 98 % (Arrieta, 2014).

2.2 Metodologías existentes

En el Cuadro 1 se resumen las principales referencias sobre distintos ensayos que recrean el efecto del DAR usando ácido sulfúrico sobre los distintos tipos de concreto.

Cuadro 1. Ensayos del efecto del DAR en concreto.

Nombre	Resultados	Observaciones	Ensayos	Ref.
Efectos del ácido en el concreto con diferentes aditivos o revestimientos	La reacción del ácido ocurre inicialmente en la superficie y, después, en el seno de la muestra. El uso de revestimientos da mejor protección que el uso de otros aditivos.	Después de la inmersión, los cubos se deben cepillar antes de realizar las mediciones.	Ensayos de carga, resistencia a la compresión, cambios en la masa, observación.	Fattuhi & Hughes, 1983
Resistencia del concreto al efecto del ácido con diferentes aditivos.	Se observa mejora en la resistencia al ácido cuando se agrega látex estireno-butadieno.	El porcentaje de pérdida de masa en los diferentes cubos es independiente de la posición del canal que suministra el ácido.	Observación, resistencia a la compresión, cambios de masa, densidad	Fattuhi & Hughes, 1986
El rendimiento de la pasta de cemento y concreto, sujetos al contacto con el ácido sulfúrico	Entre más cemento tenga el concreto, mayor será la pérdida de masa debido a la reacción con el ácido y a la remoción de la disolución.	El ensayo fue hecho en solo cemento y en concreto. Las fracturas en los cubos por el deterioro ocasionan que estos se rompan completamente	Cambio de masa.	Fattuhi & Hughes, 1988
Respuesta del concreto al contacto con el ácido sulfúrico.	En el Ciclo Alternado, hay mayor expansión e incrementa el grado de deterioro, ya que aumenta la permeabilidad por las fracturas de secado. El Ciclo Continuo, tiene menos efectos negativos. Entre menor sea el pH hay incremento de volumen y disminución de la densidad, por lo que hay una pérdida menor de masa.	El Ciclo Alternado representa un ensayo más acelerado del efecto en el concreto debido al agrietamiento por secado y la disolución de carbonatos.	Masa, espesor, escáner electrónico, observación.	Attigbe & Rizkalla, 1988.
Simulación del efecto de sulfatos en concreto in situ.	El efecto de sulfato en el concreto es disminuir la resistencia a la compresión, esto en función de la concentración de sulfato y del tiempo de exposición.	La reacción se ocurre en los espacios intersticiales, al entrar en contacto el cemento con el sulfato.	Resistencia a la compresión.	Kumar & Kam eswara, 1995

Nombre	Resultados	Observaciones	Ensayos	Ref.
Un estudio experimental del efecto del ácido y del sulfato en el concreto.	Las muestras fueron deterioradas lo suficiente como para exponer los agregados en las caras del cubo. En la difracción de rayos X se identificaron los minerales cuarzo, calcita, portlantita y etringita y principalmente yeso.	La reacción del ácido comienza en las esquinas y en los filos. Mientras el carbonato de calcio decrece, el yeso se incrementa. Hay un crecimiento de taumansita.	Observación, análisis por difracción de rayos X.	Hill et al., 2003
Investigación de los efectos de la lluvia ácida sobre el deterioro del cemento utilizando ensayos acelerados establecidos en el laboratorio.	El ácido y la lluvia ácida afectan directamente los carbonatos de la infraestructura y del concreto, causando cambios en las características del concreto como la resistencia a la compresión y la concentración de CaO.	Se utilizaron ensayos de remojo y de aerosol para simular la lluvia, en cuartos completamente condicionados, con temperatura y presión controlables.	Resistencia a la compresión, difracción rayos X, profundidad del efecto, pérdida de CaO.	Xie et al., 2004
El uso de agregados de piedra caliza y de diferentes cementos para mejorar la resistencia del concreto al contacto con el ácido sulfúrico.	El concreto con mejor resistencia al ácido tenía agregados de caliza y ceniza y silicio en el cemento. La prueba de carga, es para medir la capacidad de soporte de los cilindros después del efecto del ácido.	El efecto inicialmente el contacto con el ácido es disminuir el pH. Luego, todos los componentes del cemento se rompen y provocan lixiviación con cualquier agregado de carbonato. Esto aumenta la porosidad y la permeabilidad.	Cambio de masa, ensayo capacidad de carga.	Chang et al. 2005
Resistencia al ácido sulfúrico en concreto de alto volumen de cenizas.	El concreto con ceniza, presenta mejor resistencia al efecto del ácido, aún más si es curado al vapor.	El pH de la disolución aumenta gradualmente debido a la descomposición de las muestras de concreto.	Resistencia, esfuerzo tensional y módulo de elasticidad.	Aydi et al., 2007
Efecto de los residuos mineros en la durabilidad del concreto, el caso de disoluciones ácidas sulfuradas.	Se confirma que la resistencia a los sulfatos mejora al emplear en el concreto la menor relación posible de agua/cemento. Se forma yeso y etringita.	Formación de etringita, yeso y taumasita, los cuales son productos sustitutos que disgregan la pasta de cemento en el concreto.	Observación, cambios químicos.	Montenegro, 2008
Aguas Agresivas en el Proyecto Hidroeléctrico Toro	Se determinó que todos los concretos evaluados, son vulnerables a la acción agresiva de aguas del Río Agrio, con acidez de pH de 2,2 a 3,4.	Las muestras de concreto, fueron afectadas por la abrasión que genera la corriente del río.	Cambio de masa.	Com. Escrita. Ing. Ignacio Arguedas. ICE. Costa Rica

Según Orndorff (2001) los estudios del impacto del DAR en carreteras se han concentrado principalmente en la generación de ácido y en su efecto en las aguas superficiales locales. Pocos ensayos se han realizado para determinar el deterioro de los materiales de las estructuras relacionadas con las carreteras que se

encuentran en localidades con DAR. Además, el deterioro estructural también ocurre cuando hay una incorporación de sulfuros en los materiales de construcción mediante los agregados del concreto.

La exposición de materiales ricos en azufre en cortes de carreteras, origina problemas técnicos, sociales y ambientales. Los problemas técnicos están relacionados con la degradación de los materiales de construcción, la alteración de los sulfuros en los cortes de carretera o en los materiales de relleno y la limitación del crecimiento de la vegetación en los márgenes de la carretera por la acidez de los suelos, lo cual promueve la erosión. Además, el desplazamiento del drenaje ácido puede desintegrar y descomponer las cunetas de los taludes. Esto ocurre cuando los materiales sulfúricos son excavados y utilizados como material de relleno en la sub-rasante, lo cual junto con la lixiviación del ácido y la oxidación de los materiales, generan cambios volumétricos que comprometen la estabilidad y provocan subsidencia en el pavimento (Orndorff, 2001).

Los problemas sociales implican la inseguridad que genera la inestabilidad en los taludes de las carreteras hacia los usuarios que transitan las vías. Los problemas ambientales se refieren a la contaminación que genera el DAR en los drenajes de los alrededores que son descargados a los ríos y aumenta su acidez y trae efectos negativos a la biota (Orndorff, 2001).

2.3 Procesos químicos al contacto con el DAR

Como ya se mencionó, el término DAR se refiere a la acidificación de las aguas naturales como consecuencia de la oxidación de rocas que contienen minerales metálicos ricos en sulfuros (USEPA, 1994; Grandia et al., 2009 & Dold, 2010; Ruiz et al., 2015c).

Durante la oxidación del mineral sulfatado, se forman iones de sulfato e iones hidronio que reducen el pH del agua y generan un ambiente tóxico para la biota de su entorno y que pueden afectar las estructuras de concreto con las que entre en contacto, ya que disuelve el cemento y los agregados que contienen carbonatos y tendría lugar la corrosión de aceros (Vargas & Fernández, 2002)

Ruiz (2004), afirma que los factores que influyen en la generación de drenaje ácido a partir de materiales rocosos con pirita son:

- El agua.
- El pH del agua.
- La concentración de oxígeno en el agua.
- La presencia de CO₂.
- La temperatura.
- La estructura cristalina de los minerales sulfurosos presentes.
- El ritmo de evacuación de los productos de reacción en el sitio.
- La capacidad de neutralización de los materiales estériles en el área de reacción.
- Un ambiente propicio para la existencia de los microorganismos que favorezcan estas reacciones.

De acuerdo con los estudios realizados previamente en la RN-27 (Ruiz et al., 2015a), se demostró que es el ácido sulfúrico generado por las rocas de aflorantes de la zona, que por su composición y la alteración hidrotermal, afecta las estructuras de concreto utilizadas para la estabilización de los taludes. Por esta razón se eligió utilizar ácido sulfúrico para los ensayos a realizar en esta investigación.

Según Vargas & Fernández (2002), cuando el concreto es atacado por disoluciones con altas concentraciones de sulfatos, presenta un aspecto hinchado con una superficie blanca y pastosa. Las reacciones químicas de los sulfatos con el hidróxido

de calcio o aluminato de calcio del cemento, provocan la recristalización y el aumento de volumen de estos y provoca la disgregación por fracturación a menor escala, destruyendo el cemento.

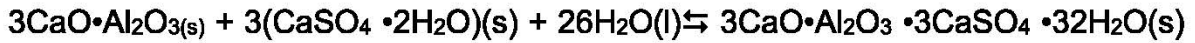
De acuerdo con Sernageomin (2015), los agentes neutralizadores, por su naturaleza química juegan un papel importante en el proceso de generación de DAR, ya que regulan la acidez. Los principales minerales neutralizadores son los carbonatos como la calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) y la ankerita ($\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg})(\text{CO}_3)_2$). La eficiencia con la que estos son capaces de amortiguar la generación de ácido es variable. Es regla general que los carbonatos se disuelven rápidamente y el mineral más común que consume el ácido es la calcita. Otros minerales como los aluminosilicatos tienden a ser menos reactivos y su capacidad de neutralización menor.

Por lo tanto, los minerales que reaccionan de manera más efectiva con el DAR son aquellos que contienen carbonato de calcio. En el caso del concreto, ocurre la pérdida de este componente al entrar en interacción con el ácido sulfúrico, originado a partir de materiales ricos en sulfuros y sulfatos. Este ácido reacciona con el carbonato de calcio y produce sulfato de calcio (yeso), agua y dióxido de carbono, que forma ácido carbónico (Ruiz, et al. 2015c):



Esta reacción implica la pérdida del componente calcáreo en la estructura, un aumento de la porosidad y un deterioro de la calidad del concreto entre otros efectos. Inicialmente se observa impacto en la superficie del material y luego la profundiza hasta alcanzar el centro del material según aumenta el tiempo de exposición, la remoción de los productos y la concentración del ácido (Attigbe & Rizkalla, 1988).

Otro proceso subsiguiente, ocurre entre el yeso y el aluminato de calcio hidratado, el cual produce sulfoaluminato de calcio, normalmente conocido como etringita ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$). Estos productos tienen un volumen mayor que los compuestos que reemplazan, de manera que la reacción con los sulfatos producen expansión y ruptura del concreto.



Ecuación 2

Yuan (2013) afirma que después de que el grado de saturación de yeso ha alcanzado su máximo, este ejerce presión sobre la pared de los poros. Sometido a la presión, el yeso se comprime mientras que el volumen de poros se amplía como se observa en la Figura 1.

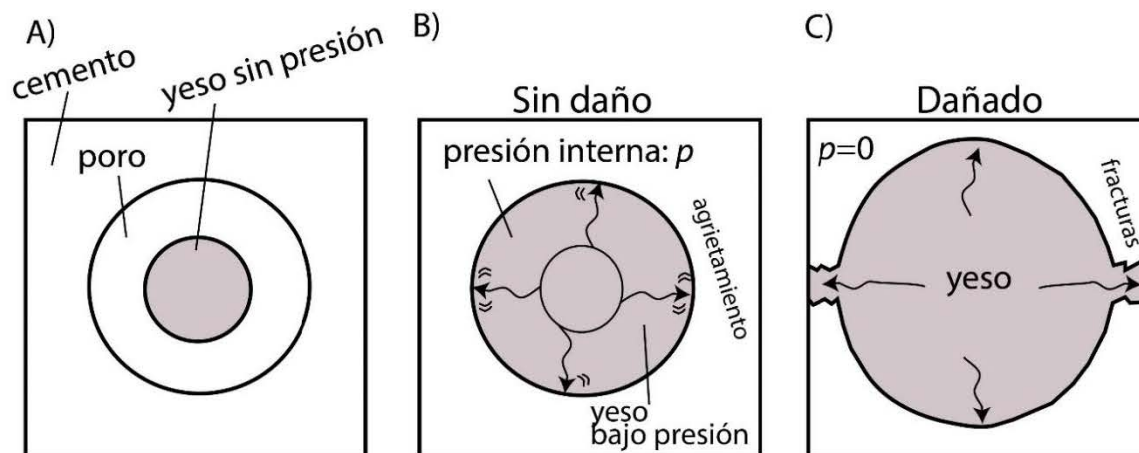


Figura 1. Esquema de las tres condiciones durante la evolución microestructural del yeso en los poros del concreto. a) Depositación inicial del yeso. b) El yeso rellena por completo el poro, hay presión interna. c) El yeso provoca agrietamiento del poro para liberar la presión. (Modificado de: Yuan, 2013).

Según Parande (2006), la formación de los productos provoca un aumento importante en el volumen del cemento que conduce a la formación de grietas y daños en la estructura. La tasa de aumento de volumen es 124% para yeso; 227% para etringita, y hay un incremento de la presión sobre la superficie del cemento. Aun así, Tian (2000), afirma que no hay que atribuirle la expansión del concreto solamente a la etringita, sino que también a las fuerzas tensionales durante la formación del yeso que inducen a la expansión y al agrietamiento.

Vargas & Fernández (2002) indican que entre los efectos que producen las aguas ácidas, está la pérdida de resistencia y de estabilidad del concreto por la reducción de la cohesión y la corrosión del acero de refuerzo. Además, cuando ocurre la lixiviación de los concretos, se produce un incremento de la permeabilidad que aumenta la infiltración y los sólidos disueltos en el agua.

Como resultado de la reacción del H_2SO_4 con el acero de refuerzo en las fracturas, se forma sulfuro de hierro. La migración del agua y del oxígeno por las fracturas forma óxidos ferrosos e hidróxidos. Estos productos también incrementan el volumen del concreto y nuevamente, agrietamiento (Parande, 2006). Los efectos del DAR en las varillas de acero que se utilizan como malla electrosoldada para la disposición de concreto lanzado son: pérdida de masa, afectación de las dimensiones y disminución de la resistencia a la tensión, debido a que son corroídas por el contacto con el ácido.

Es importante considerar, la cinética de las reacciones químicas del DAR en los materiales, ya que esto determina la velocidad con que la disolución ácida reaccionará con los componentes de la muestra, en un tiempo determinado.

2.4 Características de las rocas como agregados para concreto

Los agregados ocupan entre un 60 % y un 70 % del volumen total de una mezcla de concreto y de ellos depende la resistencia y durabilidad del mismo, así como indican las características de la mezcla (Chan et al., 2003).

En el Cuadro 2, se muestran las observaciones relativas a ciertos agregados de tipos de roca de interés, en el uso del concreto (Chan et al., 2003).

Cuadro 2. Rocas y su uso en concreto (Chan et al., 2003).

Tipo de roca y origen	Nombre	Comp. mineralógicos	Textura	Estructura	Observaciones relativas a su uso en el concreto
Plutónicas	Granito	Cuarzo, feldespatos, mica y plagioclasas	Fanerítica	Batolitos cuerpos intrusivos	Fácilmente alterada en clima tropical, meteorización esferoidal
Volcánicas piroclásticas	Andesita	Plagioclasas, vidrio y mica	Afanítica porfirítica	Derrames de lava	-
	Basalto	P1, V Y M	Afanítica vesicular	Derrames de lava	Alta resistencia a la compresión y a la abrasión, porosa
	Tobas	Variable	Porfídica	Pseudoestratificación	Dependiendo de la mineralogía pueden ser reactivas o no y algunas son muy deleznable
Clásticas	Arenisca	Cuarzo, plagioclasas y fragmentos de roca	Fragmentos 2 mm a 1/16 mm de diámetro	Estratificación, masiva, lentes	Puede contener cementante silicio que es reactivo con los álcalis del cemento
	Lutita	Materiales arcillosos	Fragmentos 1/16 mm de diámetro	Laminación masiva	Altamente soluble
No clásticas	Caliza	Calcita	Cristalina	Estratificación masiva.	Altamente soluble
	Yeso	Yeso anhidrita	Cristalina	Vetas y lentes	Muy ligero, baja resistencia a la abrasión.

2.5 Características generales típicas del DAR

El DAR se origina porque las reacciones químicas de oxidación de los sulfuros producen ácido sulfúrico en medio acuoso y el pH de la disolución se reduce a valores menores de 5. Este proceso es difícil de predecir y prevenir, y permanece latente en una región; estas razones hacen que remediarlo sea difícil y costoso, además, origina contaminación y compromete los ecosistemas acuáticos, ya que pueden incrementar la concentración de elementos tóxicos en el agua y en la biota. Una preocupación es que el agua contaminada con elementos tóxicos es muy difícil de tratar (USEPA, 1994; Dold, 2009; Rodríguez, 2010).

2.6 Descripción microscópica

Para una mejor comprensión del comportamiento del material en contacto con el DAR, se toman en consideración las relaciones existentes entre el nivel microscópico y microestructural, la composición química de los materiales con sus propiedades físicas y mecánicas en una muestra sana, comparada con una muestra expuesta al DAR por un tiempo determinado. Para la descripción microestructural se utilizan el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), con la técnica de dispersión a rayos X (*EDX* por sus siglas en inglés "*Energy-dispersive X-ray*".) Para la descripción microscópica se utiliza el microscopio óptico.

De acuerdo con Tixier (2000), es posible identificar los minerales (ricos en azufre) que afectan la muestra y rellenan las fracturas con el adecuado análisis de la microestructura. Además, al determinar los efectos de los agentes agresivos en la resistencia y rigidez del concreto, es posible determinar la durabilidad de este. Otros parámetros microestructurales son el grado de hidratación y la porosidad capilar.

Ramírez (2008) indica que el principio de funcionamiento del MEB, es un cañón de electrones que provoca un haz, orientado por lentes proyectoras y lentes magnéticos a un punto cuyo diámetro puede variar de 5 – 100 nm en el plano de la muestra. El sistema completo está sellado y la columna del microscopio puede ser evacuada a presiones de $1,33 \times 10^{-4}$ Pa. Un generador de barrido conduce simultáneamente la bobina de barrido en los ejes XY en la columna del microscopio y en el tubo de rayos catódicos. Entre los tipos de respuesta producidos, están los electrones secundarios, electrones retro-dispersados y los rayos X, estos son colectados por detectores para formar imágenes que proporcionan información sobre la topografía y sobre la composición química de la muestra bajo análisis. Cuando un haz de electrones primario incide en un volumen sólido, los electrones son reflejados o absorbidos, produciendo varias señales, las cuales pueden ser empleadas para la generación de imágenes y caracterización química y estructural de la muestra.

De acuerdo con Ramírez (2008), el MEB tiene distintas ventajas en la caracterización del concreto, cemento y microestructuras de agregados, en los cuales se pueden identificar los compuestos que se generan de la hidratación del cemento, como la etringita que es un cristal que forma agujas largas, delgadas e incoloras, comúnmente agrupados radialmente, tiene de media a baja birrefringencia y se desarrollan principalmente en fracturas y poros (Poole & Sims, 2015).

En la Figura 2, en la sección A, se observan los hidróxidos de calcio que tienen forma de placas hexagonales y la etringita en forma de agujas. En la sección B, están los compuestos de silicatos de calcio hidratado que tienen estructura amorfa. En la sección C con en una fotografía de sección delgada, se muestra la formación de etringita, sustituyendo la matriz en los bordes de los agregados.

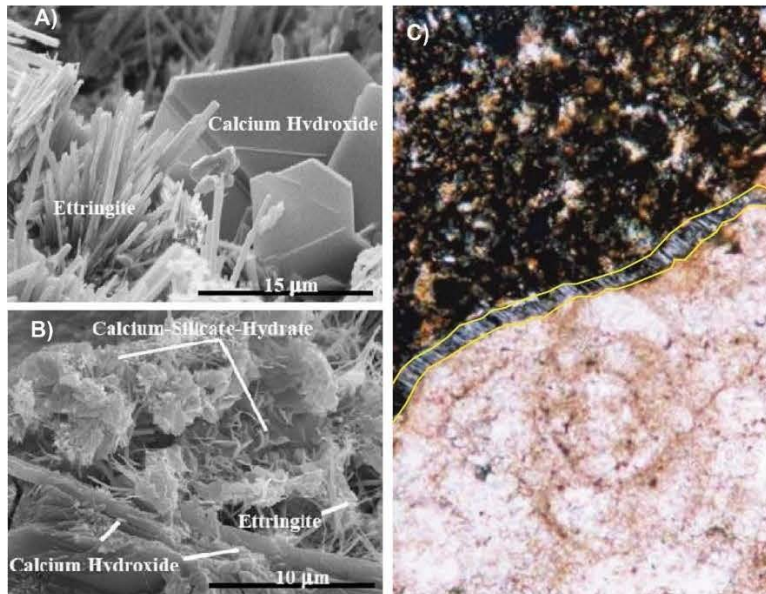


Figura 2. A) y B) Microfotografías de etringita e hidróxidos de calcio. (Fuente: Ramírez, 2008). C) Fotografía de sección delgada de etringita que se forma en el borde del agregado, con un espesor de 0,4 mm. (Modificado de: Poole & Sims, 2015).

En la Figura 3, se observa la formación de cristales de etringita y su espectro elemental obtenido por medio de EDX, el cual se caracteriza por una alta concentración de calcio, azufre y aluminio. Se omite la concentración de oro ya que esto se debe a la cobertura iónica que se coloca sobre la muestra para mejorar la resolución en las fotografías.

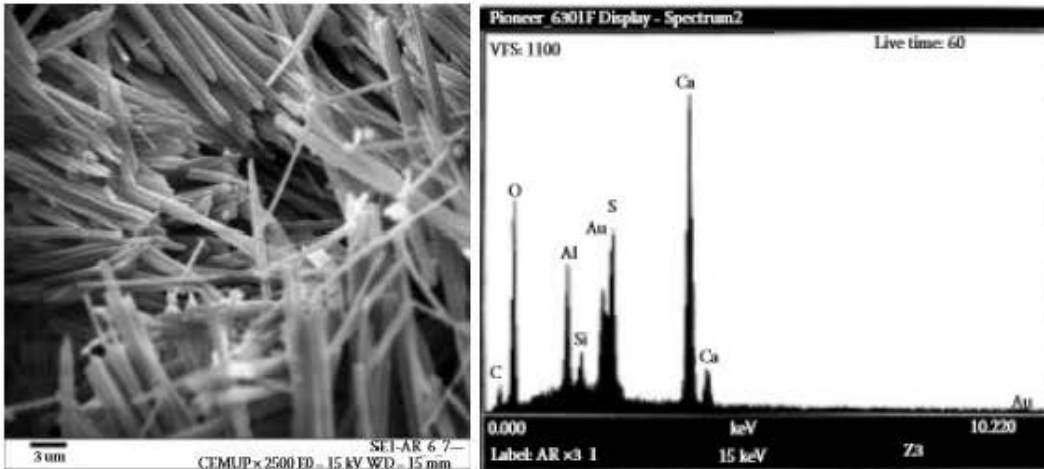


Figura 3. Cristales de etringita y su respectivo espectro elemental con un concentraciones de calcio, azufre y aluminio principalmente. (Fuente: Poole & Sims, 2015).

Las características ópticas de los principales minerales de alteración, yeso y etringita, de acuerdo con Poole & Sims (2015) se observan en el Cuadro 3, el cual demuestra su similitud y la dificultad de distinguirlos ópticamente.

Cuadro 3. Comparación de las características ópticas de yeso y la etringita.

	Yeso	Etringita
Composición química	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ca}_2\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$
Sistema cristallino	Monoclínico	Trigonal
Figura de Interferencia	Biaxial positivo con $2V = 58^\circ$	Usualmente los cristales son muy pequeños para obtener la figura de interferencia
Birrefringencia	Baja, primer orden de grises hasta blanco	Baja, primer orden, gris-blanco debido a la pequeña dimensión de las agujas
Extinción	Paralela	Paralela
Forma	Agregados anhédricos a subhédricos a menudo con granos irregulares. Puede mostrar estructura fibrosa	Agujas, que bajo MEB puede llegar a ser varillas. A menudo presentes como agujas cruzadas al azar en los poros y las fisuras. Las agujas tienen unas micras de dimensión transversal. La etringita suele ser submicroscópica.
Clivaje	Perfecto en dirección (010)	-
Maclas	Maclas simples, por el calentamiento de la muestra en la preparación	-
Orientación	Paralelas a los rayos lentos y rápidos	Las agujas son de longitud rápida
Color	Incoloro en sección delgada	Incoloro en sección delgada
Notas	Se forma comúnmente en concreto atacado por ácido sulfúrico.	Es un producto formado en concreto por el ataque de ácido sulfúrico

De acuerdo con (Attiogbe & Rizkalla, 1988), para la descripción del concreto, previo y posterior a la exposición a disolución ácida, se considera que el principal componente que evidencia un cambio, es la concentración de sulfuros, ya que este es el producto de la reacción del cemento con el ácido sulfúrico, que no se encontraba en un concreto sano.

2.7 Geología

De acuerdo con Porras et al. (2012) y Ruiz et al. (2015c), a lo largo de la RN-27, aflora la Formación Grifo Alto. Está conformada de una sucesión inclinada ($N40^{\circ}W/30^{\circ}$) de rocas volcánicas del Plioceno, expuestas en los montes del Aguacate, predominantemente brechas volcánicas constituidas por fragmentos de pómez, lavas, depósitos aluvionales, y de coladas subordinadas. Específicamente en los sitios analizados afloran coladas de lavas masivas, afectadas por fallas tectónicas, fracturas, alteración hidrotermal (Denyer & Arias, 1991; Porras et al., 2012, Ruiz et al., 2015c).

Debido a la fracturación del terreno y por los procesos normales de meteorización en una zona tropical, estas lavas presentan diferentes grados de alteración, que van desde leve, hasta la degradación completa de los minerales originales constituyentes de las rocas.

En varios sitios donde hay presencia de alteración hidrotermal, las rocas pueden presentar arcillitización intensa o silicificación, lo que las hace más duras y resistentes a la meteorización química y la erosión. Sin embargo, estos sitios no son de gran extensión. Los que sí predominan son los sitios con gran degradación de los materiales, especialmente en el estacionamiento del km 48+000. Un plano de falla identificado en este sitio, tiene un rumbo de $N 24^{\circ} E$, con un buzamiento de 66° hacia el NW (Ruiz et al, 2015c).

Se eligieron tres sitios principales en la RN-27, donde el impacto del DAR está confirmado, con el deterioro del concreto lanzado utilizado para su estabilizar los taludes. Estos han sido monitoreados periódicamente gracias a las investigaciones realizadas desde el 2013 por LanammeUCR, de acuerdo con Garro et al. (2013),

Naranjo (2013a), Naranjo (2013b), Valverde et al. (2014), Valverde et al. (2015), Ruiz et al. (2015a), Ruiz et al. (2015b), Ruiz et al. (2015c), Valverde et al. (2016).

2.8 Descripción de estado de los taludes

La descripción del impacto en obras de concreto en carretera se hizo cualitativamente en taludes que contengan concreto lanzado y cunetas, con la observación detallada de los sitios seleccionados y fotografías en el campo. Con esta información se evidencia que el talud está siendo impactado por DAR.

2.8.1 Estacionamiento km 38+600

El talud derecho, se encuentra recubierto de concreto lanzado como sistema de protección y estabilización. Sin embargo, está muy deteriorado y actualmente no cumple la función (Figura 4). Como parte de la serie de deterioros, se observa agrietamiento tanto en dirección vertical como horizontal, con grietas que pueden alcanzar varios centímetros de separación, y con una profundidad igual al espesor de la pantalla de concreto. Se observan eyecciones de eflorescencia e impregnaciones de óxidos color naranja en algunos sectores de la cobertura de concreto lanzado, además de crecimiento de vegetación, lo que indica que las grietas atraviesan por completo el espesor de concreto (Ruiz et al., 2015c). De acuerdo con el análisis de pH en pasta de este talud en Ruiz et al., (2015a), tiene un valor promedio de pH de 2,92.

La parte inferior de los taludes está silicificada y parecen ser más estables, en la parte media y superior, la brecha volcánica tiene una matriz muy alterada con tonalidades rojizas y moradas, típicas de una zona afectada por alteración hidrotermal.

La zona de cunetas está muy alterada por el DAR con coloración naranja, gris y morados, con suelo arcilloso de alta plasticidad. Hay poca vegetación y los bloques de roca expuestos están altamente meteorizados y redondeados.



Figura 4. A) Talud derecho del estacionamiento km 38+600, pared recubierta por concreto lanzado y una malla de control de erosión en el sitio donde ya se ha presentado un desprendimiento del concreto lanzado. B) Berma del talud derecho, que presenta presencia de DAR y caída de bloques. C) Desgaste en la matriz del concreto de la cuneta.

De acuerdo con Ruiz et al., (2015c), morfológicamente el margen derecho se caracteriza como un talud de corte con una sección de 190 m de longitud de concreto lanzado muy deteriorada y otra sección de menor longitud sin protección superficial, con una la altura máxima 35 m sobre el nivel de la carretera. Presenta una sección con tres áreas separadas por cunetas con pendientes cercanas a 35° y entre 8°- 35° en la parte superior de las terrazas. Las líneas de flujo del agua

dentro del macizo tienen una dirección de norte a sur, por esta razón los fluidos salen en el frente del talud cubierto por el concreto lanzado.

Ruiz et al., (2015c) describe la presencia de pátinas de óxidos de hierro y manganeso en el concreto lanzado y las cunetas. Estas estructuras de drenaje se observan muy desgastadas en la parte central por donde discurre el agua y los agregados lúicos están completamente expuestos, lo que evidencia la pérdida del componente calcáreo. El concreto lanzado de este sitio presenta lixiviación intensa que ha afectado severamente sus propiedades físicas, hasta el punto de que se desgrana completamente.

En la parte inferior del talud, el concreto lanzado está agrietado y permite la salida de agua, que está lavando el material más fino y suelos, lo cual ha ocasionado inestabilidad al talud (Figura 5). En las zonas donde el concreto ha colapsado, hay material en voladizo y el acero de las mallas electrosoldadas está expuesto con oxidación y corrosión intensa. De acuerdo con el análisis de pH en pasta de este talud en Ruiz et al., (2015a), tiene un rango de pH entre 4,20 y 6,04.



Figura 5. Desgaste del concreto lanzado al pie del talud derecho del km 38+600. Se observa la erosión de finos.

El talud del lado izquierdo, tiene una longitud de 220 m y una altura máxima de 15 m, con pendientes superiores a 35° y dos bermas en la parte superior con contra cunetas. Además, presenta bloques expuestos subredondeados con contacto flotante, los tamaños varían de decimétricos a milimétricos. Se observa sedimentación y caída de bloques en la base del talud afectada por DAR de color café y naranja.

Este talud está parcialmente cubierto por un manto para el control de erosión, anclado con pines de acero. Debido al paso del tiempo y la exposición a los elementos como sol, viento y lluvia, tiene un severo deterioro y prácticamente ya no cumple ninguna función (Figura 6). Actualmente, está reconstruido con cobertura total del talud.

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 la topografía original antes del corte de la carretera, hacia el sur (Ruiz et al. 2015c).

La medición del pH *in situ* de las aguas que fluyen en la parte inferior del talud, dio como resultado 3,24, y según registros anteriores se mantiene en $\leq 5,5$.

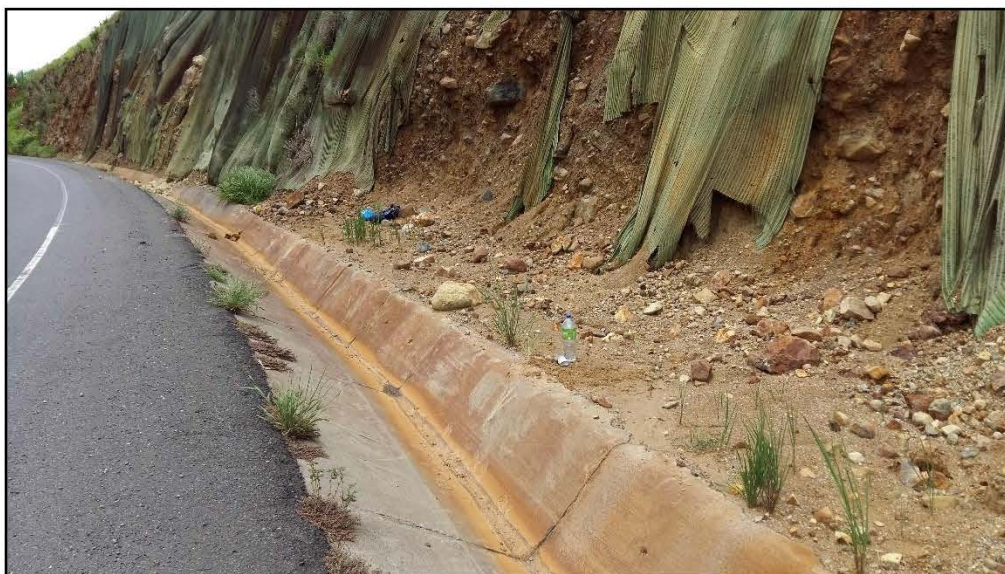


Figura 6. Talud izquierdo del km 38+600, erosión y desgaste en el talud que afectó la malla.

De acuerdo con Vargas & Fernández (2002), es importante la aplicación de las metodologías de análisis hidrogeoquímicos en la construcción de estructuras revestidas en concreto. Por lo tanto, se hace una comparación de los análisis de agua realizados por Ruiz et al., (2015c), en los estacionamientos de los km 21+400 y 48+000, con el análisis del agua elaborado para este estudio en el km 38+600 (Cuadro 4). El agua del último talud analizado, se caracteriza por presentar alta conductividad eléctrica y es concentrada en todos los iones mayores, excepto para el potasio; su bajo pH implica una reducción en la presencia de iones carbonato libres; el principal anión es el sulfato (443 mg/L), proveniente de la oxidación del sulfuro de las rocas y reacciona con el componente calcáreo del concreto. El Ca^{2+} es el catión más abundante y junto al Mg^{2+} le dan mayor dureza a esas aguas. La acidez de esta muestra es menor que la del km 48+000, y tiene menor concentración de sulfatos, lo que implica que es menos agresiva que el drenaje del km 48+000. Sin embargo, sí presenta características que pueden afectar los materiales con los que entra en contacto, a diferencia del km 21+400, donde no se confirma la presencia de DAR.

Cuadro 4. Resultados geoquímicos del análisis de muestras de agua en la RN-27 de acuerdo con Ruiz et al. 2015 y del presente trabajo.

N° LGQ Fuente:	unidades	LGQ141020-01 (Ruiz et al, 2015a)	LGQ141020-02 (Ruiz et al, 2015a)	LGQ170220-01 Presente est.
Código original		Q01	R03	DAR km 38+600
Fecha de toma	(dd/mm/aa)	20/10/2014	20/10/2014	17/2/2017
Estacionamiento		km 21+400	km 48+000	Km 38+600
Temperatura	°C	29,7 ± 0,1	38,2 ± 0,1	18,0 ± 0,1
pH	pH	7,78 ± 0,01	1,53 ± 0,01	3,0 ± 0,1
Cond.	µS/cm	287,5 ± 0,1	17485 ± 1	1241 ± 0,1
OD	mg/L	7,0 ± 0,1	0,71 ± 0,1	
ORP	mV	70 ± 10	428 ± 20	
Litio	mg/L	< 0,009	< 0,9	< 0,05
Sodio	mg/L	17,4 ± 0,4	32 ± 4	30 ± 1
Amonio	mg/L	< 0,04	12 ± 3	< 0,7
Potasio	mg/L	1,13 ± 0,06	1,8 ± 0,6	6,7 ± 0,2
Calcio	mg/L	52,3 ± 0,8	672 ± 6	59 ± 2
Magnesio	mg/L	1,20 ± 0,04	590 ± 3	20 ± 2
Fluoruro	mg/L	0,22 ± 0,09	71 ± 8	0,38 ± 0,07
Cloruro	mg/L	1,02 ± 0,05	8 ± 2	1,1 ± 0,1
Nitrito	mg/L	< 0,6	< 57	< 0,5
Nitrato	mg/L	< 0,6	< 66	< 0,5
Fosfato	mg/L	< 2	< 190	< 1
Sulfato	mg/L	16,3 ± 0,5	(40 ± 1) × 1000	443 ± 10
Dureza cálcica	mg/L CaCO ₃	131	1678	147
Dureza magnésica	mg/L CaCO ₃	5	2430	81
Dureza total	mg/L CaCO ₃	136	4108	227
Alcalinidad OH/CO₃	mg/L CaCO ₃	< 1	no se midió	< 2
Alcalinidad HCO₃	mg/L CaCO ₃	268	no se midió	< 2,1
Alcalinidad total	mg/L CaCO ₃	268	no se midió	< 2,1
Carbonatos	mg/L	< 1	no se midió	< 2,1
Bicarbonatos	mg/L	164	no se midió	< 2,1
Densidad	g/mL	0,998	1,041	1,0020

2.8.2 Estacionamiento km 47+000

De acuerdo con Porras et al., (2012), este estacionamiento presenta fallas y fracturas con rumbo predominante N 15-25° E y otras pocas con rumbo N 55° E. Este autor describe la zona como parte de un acuífero geotermal fósil en ebullición o de fase de vapor, donde las fracturas pudieron ser chimeneas para el transporte de fluidos ácido – sulfatados, por la transformación de H_2S en H_2SO_4 causando lixiviación ácida y alteración argilítica.

Ruiz et al., (2015c) identifica en talud del lado derecho los primeros indicios y deterioro del concreto lanzado y en los drenajes, y observó la presencia de óxidos y sales, grietas y eflorescencia secundaria.

Sin embargo, el talud del lado izquierdo se encuentra completamente meteorizado con lavas fracturadas y alteradas hidrotermalmente, evidenciando el efecto del DAR. Este talud no está cubierto con concreto lanzado y se observa desgastado, fracturado con erosión de finos y alterado con coloraciones naranjas y rojizas que mancha las cunetas y crea una pátina de óxidos sobre ella (Figura 7).



Figura 7. Talud izquierdo, estacionamiento km 47+000.

2.8.3 Estacionamiento km 48+000

Es uno de los taludes estudiados que presenta mayor impacto del DAR en degradación de los materiales, pese a que no se observan deslizamientos importantes, debido a la geometría y disposición de las terrazas, el DAR incide directamente en la profundización de la alteración de los materiales. Se conforma por roca andesítica meteorizada y comprende de un plano de falla con rumbo de N 24° E y con un buzamiento de 66° hacia el NW. Se observan las fracturas y diferentes tonalidades en las rocas alteradas donde hay presencia de alteración hidrotermal, las cuales pueden tener arcillitización intensa o en otros casos procesos de silicificación, tornándose más duras y resistentes a la meteorización química y erosión (Ruiz et al., (2015a).

El talud derecho tiene una altura máxima 34,05 m y está compuesto por cinco bermas con espacios para contra cunetas y el talud izquierdo tiene una altura de 25,5 m. Ambos se extienden a lo largo de la carretera aproximadamente 130 m. Presentan diferentes tonalidades y grados de alteración. En los sitios donde la roca está menos alterada, la matriz presenta tonalidades de color gris claro, se observan algunos fenocristales de plagioclasas. Las tonalidades rojizas, anaranjadas, moradas y blancuzcas están asociadas con zonas de fracturamiento intenso y zonas de falla. En un plano de falla en el talud izquierdo se observó azufre en las estrías de falla y en otro sitio se observó esferas centimétricas de este mineral; en las rocas de este sitio son abundantes los cristales de pirita (> 40%) y se puede observar a simple vista (Ruiz et al., (2015a).

Las cunetas de ambos taludes están expuestas a condiciones que aceleran su deterioro, lo que impide el manejo adecuado de las aguas superficiales que influyen negativamente en la estabilidad del talud, debido a la meteorización química intensa en los materiales originales y la erosión hídrica que puede resultar en pequeños colapsos (Valverde et al., 2016c).

Ruiz et al., (2015a) clasifica al talud como altamente ácido ($\text{pH} \pm 2,8$), y según la clasificación de USEPA (1994), se trata de suelos altamente ácidos y blandos ácidos. En la Figura 8, se observa la formación de pátinas de oxidación sobre el suelo con tonalidades rojiza y café.

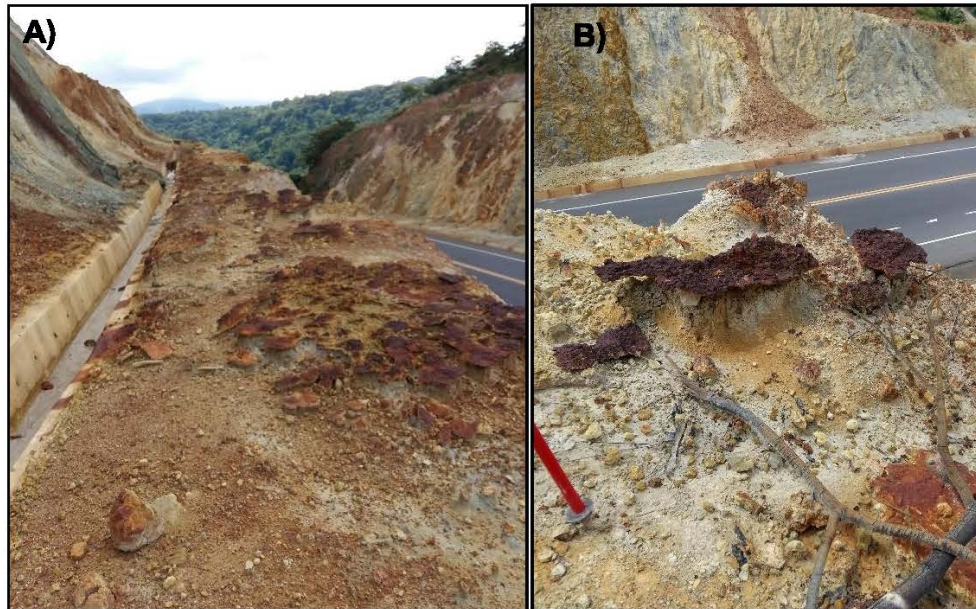


Figura 8. A) Terraza del talud izquierdo del km 48+000. B) Se observan las pátinas de óxidos formados en el suelo.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

La metodología de este estudio para identificar el efecto del DAR en rocas y en el concreto se explica a continuación en la Figura 9 y en la Figura 10.

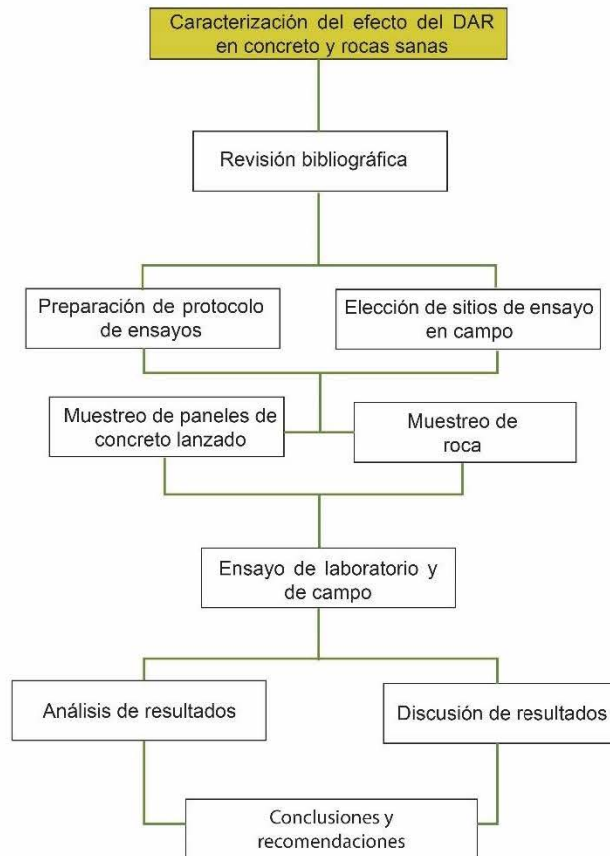


Figura 9. Diagrama de flujo con la metodología de trabajo para la realización de esta investigación.

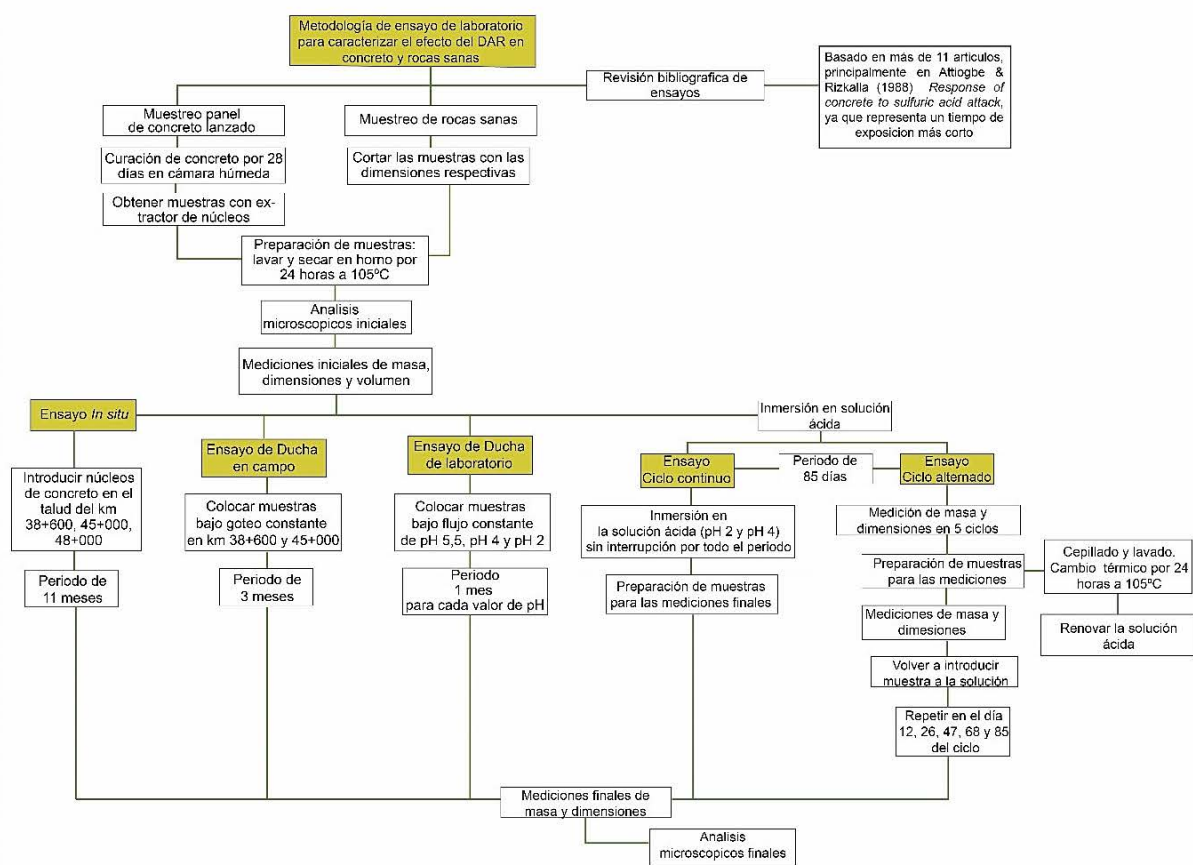


Figura 10. Diagrama de flujo de la metodología del ensayo para caracterizar el efecto del DAR en concreto lanzado y rocas sanas.

En esta metodología se siguieron las recomendaciones de las normas ASTM:

- ASTM C1604 (2012): dimensiones de los núcleos con relación 1:2, entre largo y ancho.
- ASTM C1723 (2016): descripción de muestras en el microscopio electrónico.
- ASTM C856 (2017): recomendaciones para la descripción petrográfica.
- ASTM C39 (2017): fórmula para obtener el volumen y la densidad de la muestra con peso sumergido.

3.1 Preparación y extracción de muestras de concreto lanzado

Para la elaboración de las muestras de concreto, se muestrearon dos paneles con dimensiones de 50 cm de ancho, 50 cm de largo y 15 cm de alto, en los cuales se proyectó vía húmeda el concreto lanzado fino, con una resistencia a la compresión a 28 días de 280 kg/cm², con agregados de arena natural lavada, polvo de piedra y piedra quinta 12,5 mm (Figura 11). En el Cuadro 5 se presentan las características del diseño del concreto lanzado.

Cuadro 5. Diseño de la mezcla de concreto.

Resistencia solicitada	280 kg/cm ²
Resistencia media de diseño $f'_{cr} = f'_c + 1.34*s(*)$	327 kg/cm ²
Revenimiento sin aditivos en planta	50 mm a 70 mm
Revenimiento con aditivos ergomix 175 en planta	120 mm \pm 20 mm
Cantidad de Agua	162 kg/m ³
Aire incluido estimado	2%
Relación a/c	0,40
Contenido de cemento	405 kg/m ³
Aditivo fluidificante Ergomix 175 RM en planta	0,7% de contenido de cemento.

Fuente: Informe No. Ic-023-16, Grupo Orosi



Figura 11. A) Proyección de concreto por parte de la empresa Geointer. B) paneles de concreto lanzado finalizados.

Posteriormente, los dos paneles se curaron por un periodo de 28 días en una cámara húmeda del laboratorio del LanammeUCR. El curado consiste en el mantenimiento de contenidos de humedad y de temperaturas satisfactorios en el concreto durante un periodo definido, con el objetivo de aumentar la resistencia y durabilidad (Attiogbe & Rizkalla, 1988).

Como se observa en la Figura 12, se utilizó un extractor de núcleos (HILTI DD130 con broca de 2 pulgadas), y se obtuvo como producto un cilindro de concreto lanzado con un diámetro de 2 pulgadas (aprox. 4,5 cm) y el largo variable; posteriormente se cortaron para que tuvieran 9 cm de largo, y una relación 1:2 en sus dimensiones.



Figura 12. A) Extractor de núcleos, HILTI DD130 con broca de 2 pulgadas. B) Núcleos extraídos del panel con diferentes longitudes.

3.2 Muestreo de rocas aflorantes.

Se seleccionaron dos estacionamientos para la extracción de muestras con rocas representativas del lugar, el km 39+000 y el km 48+000 que pertenecen a la formación Grifo Alto. Las rocas se extrajeron de zonas sanas, cerca de sitios con alto impacto del DAR. Se procedió a tomar la muestra del km 39+000, cerca del km 38+600, debido a que la brecha volcánica en este sitio se encuentra sana y el por el fácil acceso para el equipo extractor de núcleos. A continuación, se muestra la descripción del afloramiento del estacionamiento km 48+000 en el Cuadro 6

Cuadro 6. Características afloramiento en el estacionamiento km 48+000

Localización	Inicio del viaducto del lado Atenas – Orotina. Lado derecho hacia Caldera antes del puente ferroviario SJ-Caldera.
Coordenadas	447 722 E / 1096935,012 N Alt: 304 m
Dimensiones del afloramiento	4 m altura x 6 m ancho
Características del afloramiento	Presenta una pátina milimétrica de color naranja – rojiza, medianamente meteorizada de coloraciones rosadas; no hay formación de suelo y hay poca vegetación. Tiene 2 familias de fracturas principales en forma de cruz.
Descripción macroscópica de la roca	Es una lava de color gris claro a blanco, con textura afanítica, muy calcificada con una pátina milimétrica de color naranja – rosa de óxidos. No se distinguen los cristales. *
Nombre de la roca	Andesita
Formación a la que pertenece	Grifo Alto

*nota: Ver Figura 13. Fotografía del afloramiento.

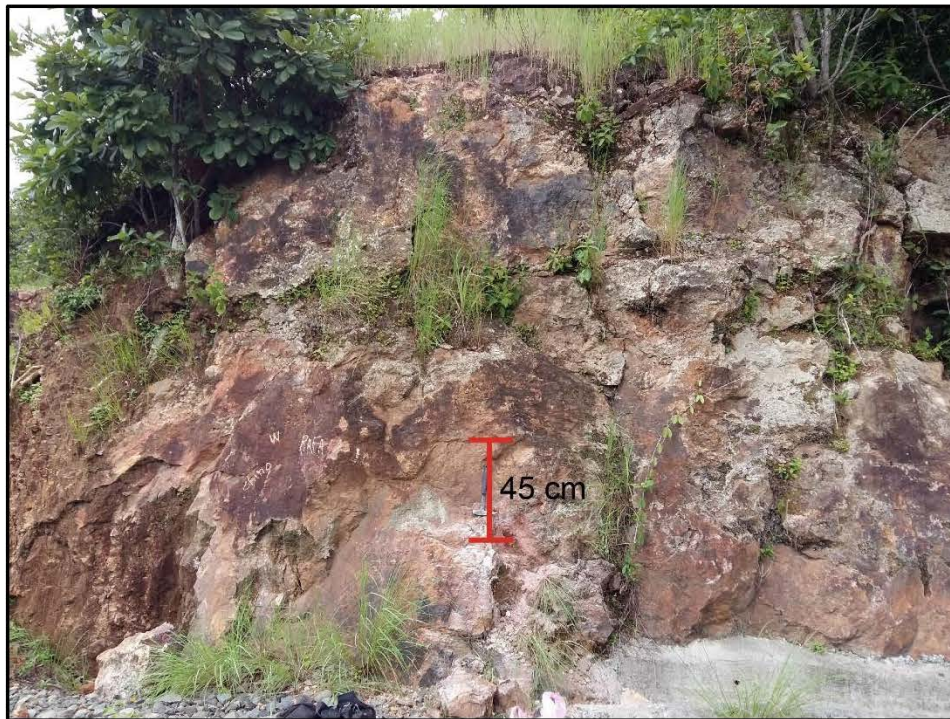


Figura 13. Afloramiento de roca en el kilómetro 48+000.

Se extrajo un bloque de roca de dimensiones 20 cm x 30 cm, que posteriormente fue enviado al Laboratorio de Petrografía de la Escuela Centroamericana de Geología, donde se realizaron los cortes de roca en forma de prismas con dimensiones de 4,5 cm de ancho por 9,0 cm de largo, para un total de 6 muestras llamadas “de roca andesita”.

En el Cuadro 7 se presentan las características físicas y macroscópicas del afloramiento del estacionamiento del km 39+000.

Cuadro 7. Características afloramiento del estacionamiento km 39+000.

Localización	Margen derecho, frente a la autopista
Coordenadas	455 095 E / 1098642,459 N Alt: 365 m
Dimensiones del afloramiento	2,0 m alto x 5,2 m ancho.
Características del afloramiento	El macizo presenta vegetación a sus alrededores. Tiene una familia de fractura principal con dirección diagonal.
Descripción macroscópica de la roca	Brecha volcánica con bloques centimétricos en una matriz grisácea (60 %). Los bloques tienen contacto flotante y son de subangulares a angulares de hasta 60 cm de largo, algunos son vesiculares, y tienen un color gris oscuro hasta rosado. Presenta meteorización de leve a moderada.
Nombre de la roca	Brecha volcánica
Formación a la que pertenece	Grifo Alto

Debido a la dureza de la roca, se utilizó un equipo extractor de núcleos marca HILTI DD130 con una broca de 2 pulgadas de la misma marca, en dirección vertical a la roca y con enfriamiento de agua (Figura 14). Posteriormente, los núcleos extraídos fueron cortados a 9 cm de largo con una cortadora industrial.

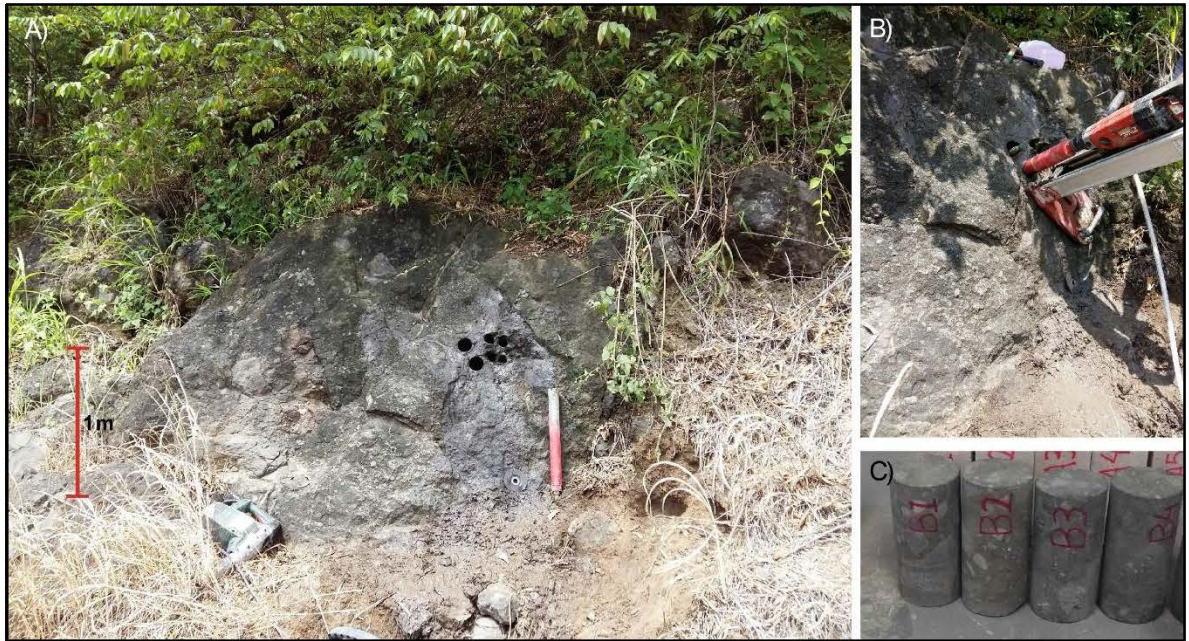


Figura 14. A) Afloramiento de brecha volcánica, en el estacionamiento km 39+000, ubicado en el margen derecho. B) Extractor de núcleos en el sitio. C) Núcleos previamente cortados a 9 cm de longitud y con su código respectivo.

3.2 Procesos de preparación y medición de muestras

Secado

Para realizar las mediciones de las propiedades físicas, se eliminó la humedad presente en todas las muestras, introduciéndolas en un horno industrial marca TOHO TIM 004 (placa HN-029), por un periodo de 24 horas a una temperatura de 105° C

Medición de masa

Para la medición de la masa de las muestras, estas deben estar completamente secas. Se cepillaron previamente y se midieron en una balanza analítica de incertidumbre $0,001 \pm 0,0005$ g Explorer OHAVS.

Medición de dimensiones

Para medir las dimensiones de la muestra, se utilizó un vernier digital calibrado de 15,00 cm de largo con una incertidumbre de $\pm 0,005$ cm. Se realizaron tres medidas de cada dimensión (diámetro y longitud), de acuerdo a la norma ASTM C1604M (2012). Las mediciones del diámetro fueron en la parte superior, medio y en la base. La longitud también se midió en tres sitios diferentes.

Medición del volumen

Se realizó conforme a la norma ASTM C39 (2017). Posterior a la obtención de la masa seca, se midió la masa sumergida no saturada, tomado en cuenta la temperatura del agua. Densidad agua (22°C) = $0,99780$ g/cm³.

$$Volumen = \frac{\text{masa seca} - \text{masa (sumergida)}}{\text{densidad del agua (22°C)}}$$

Descripción microscópica

Para la descripción microscópica se utilizó un microscopio óptico marca NIKON. Se prepararon secciones delgadas de cada tipo de muestra, tanto en su estado inicial como al finalizar cada ensayo, en el Laboratorio de Petrografía de la Escuela Centroamericana de Geología. Esto con el fin de realizar una comparación de los cambios en las texturas de los componentes de la muestra.

Descripción microestructural

Con el equipo MEB se realizó el análisis EDX, para obtener el espectro elemental de las muestras en su estado inicial y posterior al contacto con el DAR.

En este análisis, las muestras deben tener dimensiones máximas de 150 mm de altura, 30 mm de diámetro y un peso máximo de 150 g. Para obtener una mejor resolución en las imágenes tomadas, se colocó sobre las muestras una cobertura de oro, debido a que este elemento tiene mayor conductividad y refleja los rayos X con facilidad. La muestra debe estar completamente seca, preferiblemente con poca porosidad y tener el menor tamaño posible.

Las imágenes tomadas mediante el MEB son llamadas microfotografías de acuerdo con la terminología utilizada en Attiogbe & Rizkalla (1988). Este término se utilizará para referirse a las imágenes microestructurales de este estudio.

3.5 Tipos de ensayo

3.5.1 Ensayo in situ

El ensayo *in situ* tiene como objetivo estudiar el efecto del DAR del campo en muestras sanas de concreto lanzado en un periodo de tiempo determinado. Por lo tanto, estas fueron enterradas en los estacionamientos km 38+600, km 47+000 y km 48+000, por un periodo de tiempo de 11 meses (23 junio del 2016 al 31 de mayo del 2017). Las condiciones de acidez, temperatura y humedad, a las que fueron expuestas las muestras, varían según las características presentes en cada talud. Al ser enterradas al pie de los taludes afectados por DAR, se espera que se encuentren en condiciones similares a las de los paneles de concreto lanzado que están en contacto directo con el talud y la escorrentía de este.

El procedimiento consistió en colocar núcleos de concreto lanzado a ≤ 10 cm de profundidad en la base del talud, con el propósito de estuvieran inmersas en suelo con características ácidas y el drenaje ácido se infiltrara y entrara en contacto los núcleos. Las propiedades físicas que se analizaron en las muestras, fueron: masa, dimensiones y características superficiales. Se registra una medición inicial y una final, para realizar la comparación de los cambios en las propiedades.

A continuación se describirá cada uno de los estacionamientos en los que se enterraron las muestras de concreto.

Estacionamiento km 38+600

Las muestras se colocaron cerca de la cuneta para que estuviesen expuestas al drenaje y que la caída de material del talud no las enterrara a mayor profundidad (Figura 15). En el Cuadro 8, se presenta toda la información de ubicación de las muestras y su profundidad.

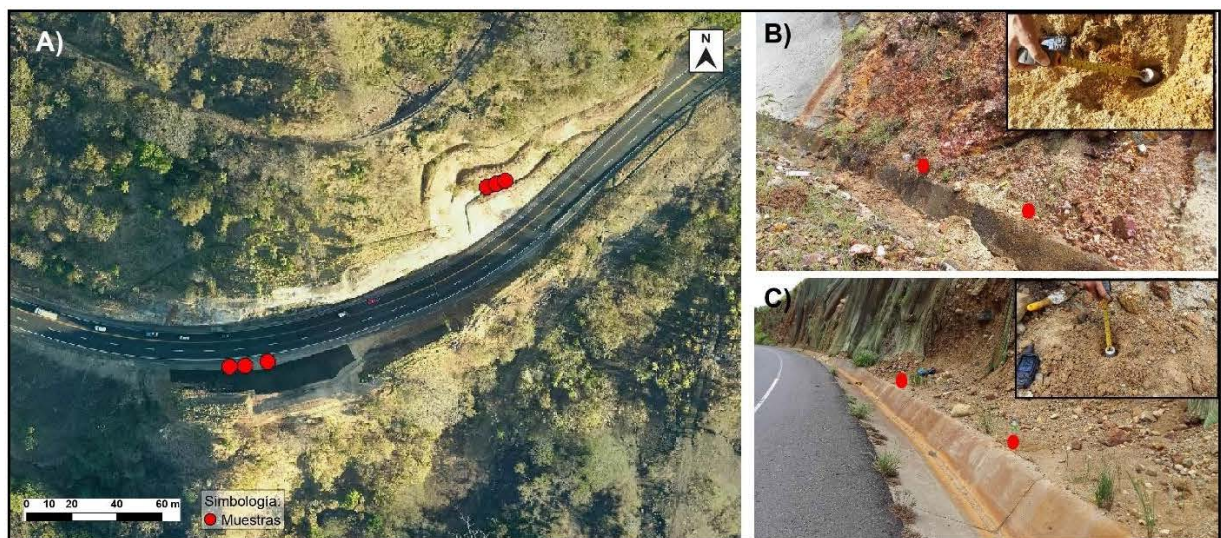


Figura 15. A) Fotografía área del estacionamiento km 38+600. B) Sitio de dos muestras en el talud derecho. C) Sitio de dos muestras en el talud izquierdo. Los puntos rojos son los sitios donde se enterraron las muestras.

Cuadro 8. Ubicación de muestras de ensayo *in situ* km 38+600.

Código muestra	Ubicación	Profundidad (cm)
Talud Derecho		
R27-01-38	455 392 E/1098658 N	3
R27-02-38	455 387 E/ 1098655 N	3
Talud Izquierdo		
R27-04-38	455 283 E/1098573 N	7
R27-05-38	455 271 E/1098571 N	5
R27-06-38	455 267 E/1098574 N	7

Estacionamiento km 47+000

En el talud derecho de este estacionamiento, hay solamente roca por lo que se dificulta colocar las muestras en este sector, entonces se procede a enterrarlas en el lado izquierdo, con una distancia de la cuneta al talud entre 10 cm y 20 cm debido a la cercanía de la pendiente (Figura 16). Los datos sobre la ubicación exacta de las muestras se encuentran en el Cuadro 9. El talud del lado izquierdo, se caracterizó por su tonalidad naranja, está altamente fracturado y tiene exposición de bloques decimétricos, además había olor a azufre.

Cuadro 9. Ubicación de muestras de ensayo *in situ* 47+000

Código muestra	Ubicación	Profundidad (cm)
R27-02-45	448 212 E/1096770 N	3
R27-03-45	448 238 E/1096765 N	6
R27-04-45	448 238 E/1096765 N	5

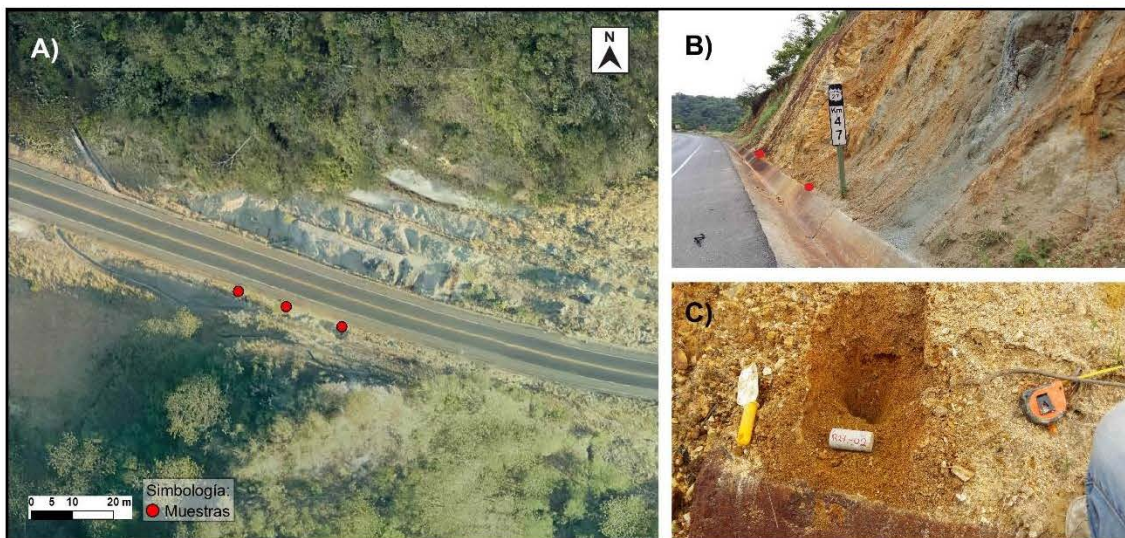


Figura 16. A) Fotografía área del estacionamiento km 47+000. B) Sitio de colocación de dos muestras en el talud izquierdo. C) Proceso de colocación de muestras. Los puntos rojos son los sitios donde se enterraron las muestras.

Estacionamiento km 48+000

En la base de los márgenes del km 48+000, se encuentran principalmente los depósitos de los materiales de caída del talud. Estos presentan coloración amarilla,

naranja y café, con bloques centimétricos muy meteorizados y surcos de esorrentía. En algunas partes se observa encharcamiento del DAR con coloración rojo intenso (Figura 17).



Figura 17. Zona de encharcamiento donde se acumula agua ácida, colores intensos y fuerte olor a azufre, con pH 2,23. Estacionamiento del km 48+000.

Se enterraron las muestras al pie del talud, en los taludes derecho e izquierdo (Figura 18). Su ubicación exacta y profundidad se observa en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Ubicación de muestras de ensayo *in situ* 48+000

Código muestra	Ubicación	Profundidad (cm)
Talud derecho		
R27-01-48	447 391 E/1096782 N	5
Talud izquierdo		
R27-04-48	447 384 E/1096764 N	4
R27-05-48	447 393 E/1096758 N	5
R27-06-48	447 403 E/1096757 N	5



Figura 18. A) Fotografía área del estacionamiento km 48+000. B) Sitio de colocación de muestras en el talud izquierdo. C) Proceso de colocación de muestras. Los puntos rojos son los sitios donde se enterraron las muestras.

Al terminar el periodo de 11 meses, se recolectaron las muestras del campo y se les realizó una limpieza con agua y un hisopo de cerdas medianamente suaves, para descartar el suelo externo adherido. Previa a la medición de sus propiedades, las muestras fueron introducidas en el horno por 24 horas a una temperatura de 105°, para eliminar la humedad.

3.5.2 Ensayo de Ciclo Continuo

El objetivo de este ensayo fue recrear en el laboratorio el efecto del DAR en muestras que se encuentren en contacto directo con aguas ácidas y sin ningún tipo de tratamiento de abrasivo o cambios de temperatura intermedios. Únicamente son controladas para mantener los valores de pH dentro de un rango permitido $\text{pH} \pm 0,5$.

En este ensayo se sumergen los tres tipos de muestras en dos disoluciones diferentes de ácido sulfúrico, una con $\text{pH } 2,0 \pm 0,5$ y otra con $\text{pH } 4,0 \pm 0,5$, por un periodo de 85 días. Fueron colocadas en un recipiente de vidrio, selladas con papel parafina para evitar que se introdujera algún material externo que afectara el control de la muestra, como se observa en la Figura 19. Se miden sus propiedades físicas, al inicio y al final del periodo.

Se realizó un control diario del valor de pH de las disoluciones, donde si superaba o disminuía el valor de pH en $\pm 0,5$, este debía ser renovado al valor respectivo inicial y así mantener las condiciones originales y propuestas en los experimentos. También se era cambiada toda la disolución ácida cuando el agua se encontraba turbia o sucia, para mantener un ambiente cristalino.



Figura 19. Recipientes con disolución ácida con pH 2 y sus respectivas muestras.

Se realizaron descripciones diarias de las condiciones de la disolución y de la muestra. Al finalizar del periodo establecido, se introdujo cada muestra al horno por un periodo de 24 horas a una temperatura de 105°C. Posteriormente se midieron la masa en la balanza electrónica y las dimensiones con un vernier digital calibrado. Después se procedió a realizar el análisis microscópico en secciones delgadas de todas las muestras, y el análisis microestructural con dispersión de rayos X a las muestras expuestas a la condición más severa, es decir, las inmersas en disolución con pH 2. Con los datos registrados se efectuó una comparación de las características iniciales y finales.

3.5.3 Ensayo de Ciclo Alternado

El objetivo del ensayo fue recrear de manera sistemática, controlada y acelerada, las condiciones de abrasión y cambios de temperatura que se presentan en los taludes de la RN-27. Por lo tanto se realizaron cinco ciclos en los cuales las muestras eran sometidas a un tratamiento de abrasión manual y de secado por un periodo de 24 horas a 105°C. Este último para estimular la formación de fracturas y que la disolución profundizada su efecto en la muestra. Posteriormente se procede a las mediciones de masa y dimensiones. Al finalizar son devueltas al recipiente de vidrio y selladas con papel parafina para evitar la entrada de agentes externos hasta el siguiente ciclo. Este ensayo tuvo un periodo total de 85 días. Cada ciclo finaliza en los días 11, 25, 46, 67 y 85. Por lo tanto la duración de cada uno es de 12, 14, 21, 21 y 17 días, respectivamente.

Los ciclos iniciales son más cortos, ya que de acuerdo con Attiogbe & Rizkalla (1988), se espera que la reacción de la disolución en las muestras produzca un mayor impacto al tener muestras más sanas. Los últimos tres ciclos son más

amplios ya que se espera que la superficie de la muestra este más impactada por lo tanto el efecto no será tan rápido.

Las muestras fueron inmersas en disolución ácida con valores de pH 2,0, pH 4,0 y pH 5,5, este último tiene como objetivo simular el efecto de la lluvia ácida en el concreto y las rocas.

En cada ciclo, se realizó una descripción del estado de la muestra y de la disolución. Después fueron sometidas a un proceso de limpieza de aquel material que se desprendiera con facilidad de la matriz. Se lavaron con agua regular y fueron cepillados con un hisopo de cerdas suaves para quitar las adherencias. Posteriormente, fueron introducidas al horno industrial por un periodo de 24 horas a una temperatura de 105° C (Figura 20).

Al finalizar el ensayo, las muestras fueron enfriadas a temperatura ambiente. Se procedió a las mediciones de sus propiedades, las cuales se registraron para generar una base de datos de los cambios de masa, dimensiones y características superficiales. Estos datos sirven para comparar el estado inicial con el estado final de las muestras y para observar los cambios que presentan en el tiempo determinado. Al terminar las mediciones se introdujeron nuevamente a la disolución ácida con su respectivo pH.



Figura 20. Muestras de concreto lanzado y roca, listas para ser introducidas al horno industrial.

3.5.4 Ensayo de núcleos expuestos directamente al flujo de DAR.

Con el objetivo de observar los cambios de las muestras de concreto lanzado bajo un flujo constante de agua ácida generada por el proceso de DAR que se da en los taludes de la RN-27, se procedió a realizar un experimento *in situ* con las condiciones naturales del DAR y del talud, y otro en el laboratorio con las condiciones de pH controladas.

3.5.4.1 Ensayo tipo Ducha ácida *in situ*

Este ensayo se llama tipo ducha ácida, debido a que la muestra se encuentra bajo un flujo o goteo constante de drenaje ácido que simula una ducha, generando también un tratamiento abrasivo sobre ella.

Se procedió a colocar dos muestras de concreto y dos muestras de roca en los estacionamientos km 38+600 y en el km 45+000. Este último, debido a la morfología del talud, facilita la colocación de la muestra bajo un flujo de drenaje ácido. Las muestras fueron expuestas a las condiciones de acidez, temperatura y oxigenación del talud por un periodo de 14 semanas. Al finalizar el periodo, se recolectaron y se comparó el estado inicial y final de las mismas. Se consideraron las características de la superficie de la muestra, la formación de una pátina de oxidación, tonalidades y cambios en la masa de la muestra.

En el estacionamiento km 38+600, en el talud derecho, se colocó una muestra de concreto lanzado y otra de brecha volcánica en un sitio que presentó goteo constante de agua ácida, que es constantemente expulsada de los drenajes sub-horizontales de talud recubierto por concreto lanzado. En este sitio se colocó la muestra de brecha volcánica debido a que es la roca que aflora en el lugar. (Figura 21). Para el estacionamiento km 45+000, se colocó una muestra de concreto lanzado y otra de andesita. Al ser un sitio muy húmedo este se colocó semi-sumergido en un encharcamiento al pie del talud, a la par de la malla de control de erosión

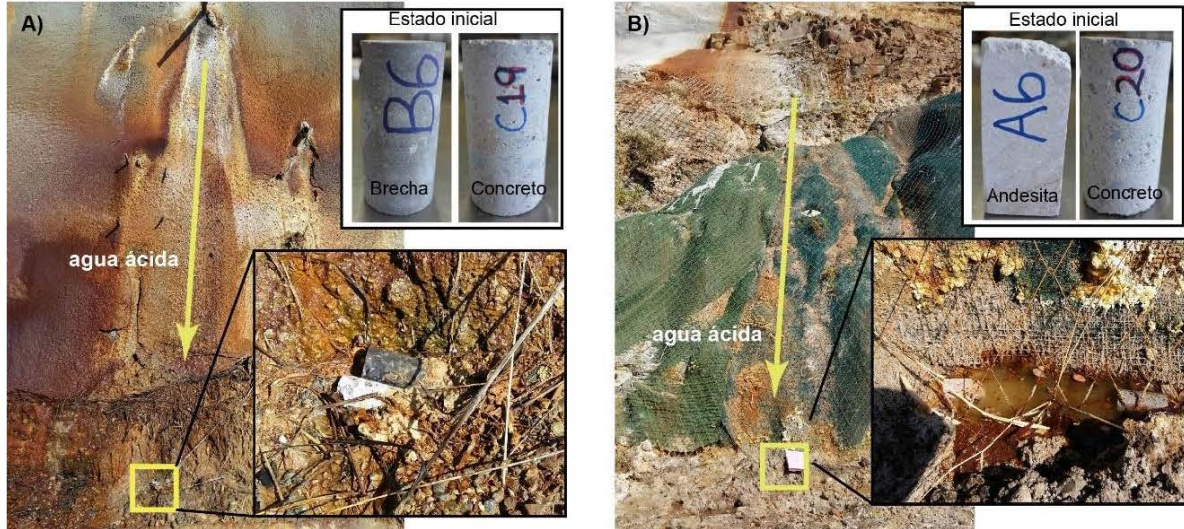


Figura 21. A) Sitio de colocación de muestras en el talud derecho estacionamiento km 38+600. B) Sitio de colocación de muestras en el talud derecho estacionamiento km 45+000.

3.5.4.2 Ensayo Ducha ácida en laboratorio

Para recrear en el laboratorio las condiciones de contacto con un flujo de agua ácida en condiciones oxigenadas similares a lo observado en el talud derecho del km 38+600, se utilizó una bomba de agua de uso subacuático para mojar constantemente las muestras de concreto, simulando precipitación constante (Figura 22).

Este ensayo se realizó con tres muestras de concreto lanzado cada uno en disoluciones con valores de pH 4, pH 5,5 expuestos por 4 semanas cada uno, y además el valor de pH 2, tuvo un total de 10 semanas de exposición. El flujo sobre la muestra se mantenía en continuo por 8 horas diarias, 5 días a la semana. Los periodos en que no se proporcionaba flujo de agua sobre la muestra, recrean los

momentos que no hay flujo en el campo. La muestra todo el tiempo se encontró a temperatura ambiente y tenía un control diario del valor de pH, para que este se mantuviera dentro del rango deseado de $\text{pH} \pm 0,5$.



Figura 22. Ensayo de flujo de DAR. Bomba subacuática para simular la precipitación constante.

Con las bases de datos recopiladas se procedió al análisis de los datos que se presentan en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO IV

4. Resultados

Los resultados de cambio de masa, dimensiones y cambios mineralógicos, producto de los cinco ensayos realizados, se presentarán en este capítulo.

4.1 Condición inicial

Se describe la condición inicial de las muestras de concreto lanzado, brecha volcánica y andesita, mediante microscopio óptico y microestructural con el método de EDX, de donde se obtuvo la concentración elemental promedio de tres sitios elegidos en cada una de las muestras, previo a los ensayos. Se considera que la descripción es representativa para todas las muestras utilizadas en los experimentos.

4.1.1 Concreto lanzado

De acuerdo con la descripción microscópica de una muestra de concreto lanzado, esta se compone de 43% de agregados del volumen total, los clastos tienen una composición volcánica y silíceo con contacto flotante y puntual en una matriz cementante carbonatada (Cuadro 11). Se asume que esta descripción debe ser similar en todas las muestras de concreto lanzado con que se trabajó en este estudio.

Cuadro 11. Descripción microscópica del concreto lanzado en secciones delgadas, de las muestras en su estado inicial.

Código	Descripción Microscópica
Prueba 1	Contiene 43 % de líticos y 57 % de matriz color gris. Los clastos tienen composición de 10 % volcánicos y 90 % silíceos (pedernal), contacto flotante y puntual. También se observan fenocristales augitas y opacos en la matriz. Ver Figura 23

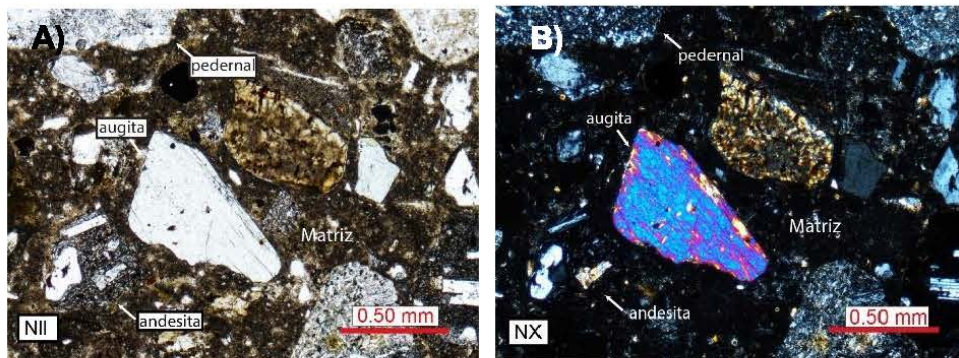


Figura 23. Fotografías de sección delgada del concreto lanzado en estado inicial. A) Nicoles paralelos. B) Nicoles cruzados

En la Figura 24, se observa la microestructura del concreto lanzado, con algunos micro-poros y fragmentos de cristales posiblemente silíceos, debido a su abundancia en el espectro elemental de la muestra.

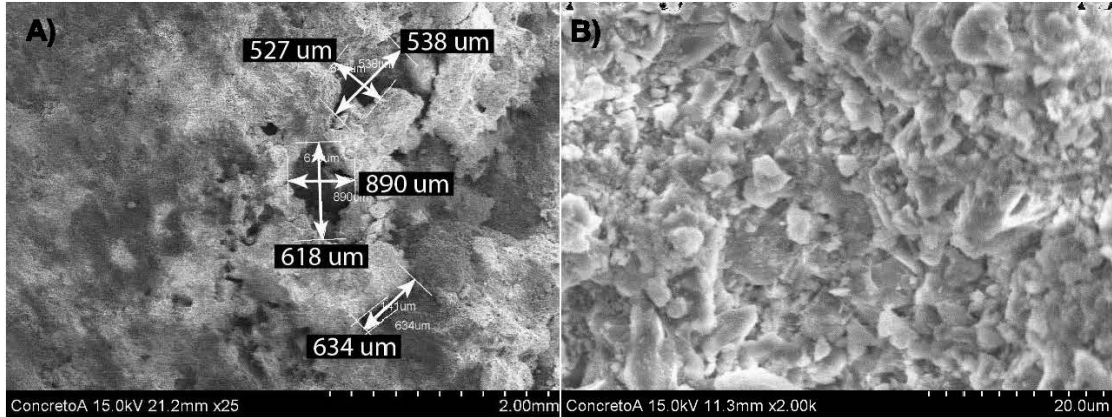


Figura 24. Microfotografías de la muestra de concreto lanzado en estado inicial. A) Poros micrométricos en la matriz en la muestra, aumento x25. B) Se observa el concreto lanzado a un aumento de x2.00K.

Cuadro 12. Concentraciones de elementos que componen el concreto lanzado, provenientes del espectro elemental en tres sitios diferentes.

Elemento	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Promedio
	Conc. %	Conc. %	Conc. %	
C	3,70	1,94	2,40	2,68
O	47,43	50,96	51,52	49,97
Na	2,23	2,39	2,13	2,25
Mg	0,81	0,76	0,63	0,73
Al	7,77	9,93	9,43	9,04
Si	27,24	24,69	25,05	25,66
P	0,24	0,00	0,12	0,12
S	0,30	0,00	0,00	0,10
Cl	0,10	0,00	0,00	0,03
K	2,40	1,75	1,56	1,90
Ca	4,17	4,62	3,71	4,17
Fe	3,61	2,95	3,45	3,33
Total	100,00	100,00	100,00	100,00

4.1.2 Brecha volcánica

La brecha volcánica que aflora en el estacionamiento km 39+000, corresponde con una roca muy heterogénea, y se caracteriza por su granulometría gruesa con bloques centimétricos a decimétricos. Está compuesta principalmente por clastos fracturados de andesita y fenocristales de calcita, también presenta carbonatos en vetillas (Cuadro 13)

Cuadro 13. Descripción microscópica de la brecha volcánica en secciones delgadas, de las muestras en su estado inicial.

Código	Descripción Microscópica
RS- km39	Clastos de andesita (59%) con fenocristales de: plagioclasa, cristales hipidiomórficos, algunos fracturados con zonación, textura cribosa, maclado en cruz y alteración por carbonatos. Augita, cristales hipidiomórficos, algunos fracturados y con maclas. Augitas titaníferas, cristales idiomórficos con inclusiones de opacos y textura ofítica y sub-ofítica. Opacos, cristales de forma xenomórfica. Calcita, cristales xenomórficos con fracturas y bordes de ceollitas. Cristales fantasmas con óxidos de hierro. Cristales opacitizados. Hay clastos fracturados. Fracturas rellenas de calcita. Matriz (41%), contiene arcilla, y microlitos de plagioclasa y augita. Secundarios: clastos arcillitizados. Carbonatos en vetillas. Ver Figura 25).

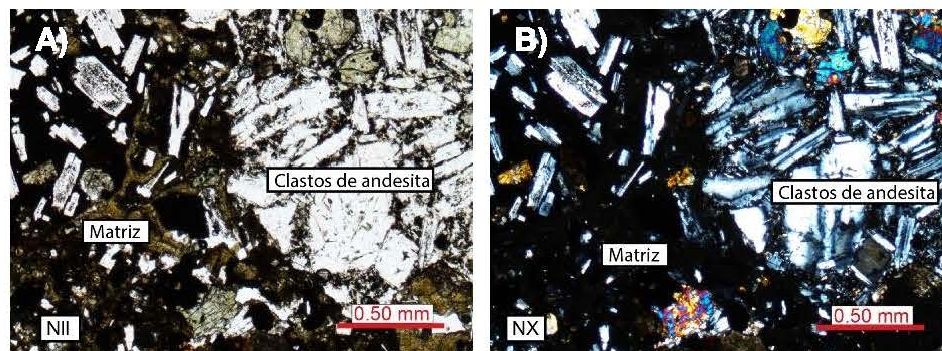


Figura 25. Fotografías de sección delgada de la muestra de brecha volcánica en estado inicial. A) Nícoles paralelos. B) Nícoles cruzados

En el análisis microestructural, se observó una superficie con micro-fracturas y la matriz arcillosa entre los clastos (Figura 26). De acuerdo al espectro elemental realizado en tres sitios diferentes, se observan concentraciones importantes de sílice, aluminio, calcio y hierro (Cuadro 14). Hay presencia de una pequeña concentración de azufre con menos del 1%, sin embargo, su potencial de generación de drenaje ácido, se da al ser expuesta a un ambiente de oxidación.

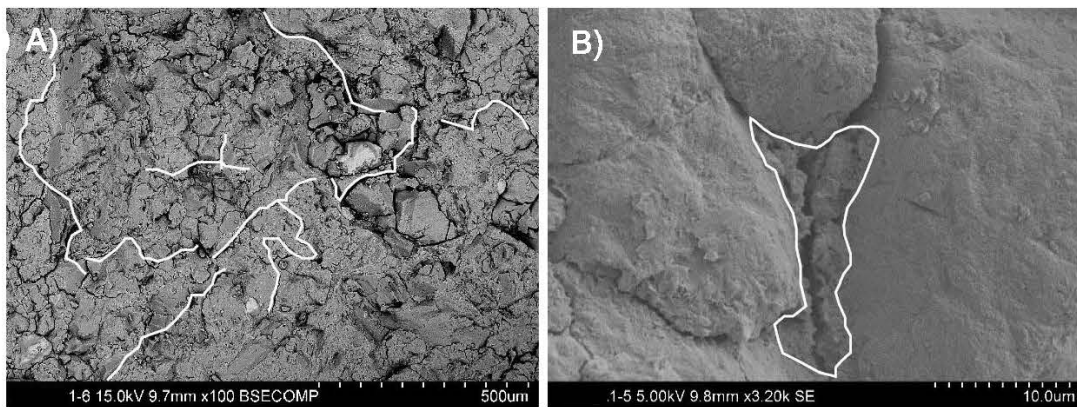


Figura 26. A) Microfotografía a un aumento de 100x, se observa micro-fracturas en la matriz. B) Arcilla relleno los espacios entre los clastos, aumento x3.20k.

Cuadro 14. Concentraciones de elementos que componen la brecha volcánica, provenientes del espectro elemental en tres sitios diferentes.

Elemento	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Promedio
	Conc. %	Conc. %	Conc. %	
O	21,02	23,18	22,05	22,08
Mg	0,00	1,39	1,23	0,87
Al	5,90	5,68	5,24	5,60
Si	14,79	15,30	14,73	14,94
S	0,27	0,27	0,31	0,29
Ca	3,88	3,12	2,47	3,16
Fe	4,37	5,24	6,01	5,21
Au	49,77	45,83	47,97	47,85
	100,00	100,00	100,00	100,00

4.1.3 Andesita

La roca andesítica fue tomada de la zona alta del talud del estacionamiento km 48+000, y se caracteriza por estar completamente silicificada, es decir, alterada con cuarzo secundario y sericita (Cuadro 15). Esta alteración es propia de las zonas de alteración hidrotermal, por lo tanto presenta cristales fantasmas de plagioclasas y posibles olivinos.

Cuadro 15. Descripción microscópica de la andesita recrystalizada en secciones delgadas, de las muestras en su estado inicial.

Código	Descripción Microscópica
RS- km48	Textura holocristalina, microcristalina. Fenocristales (8 %): Opacos, cristales xenomórficos de grano fino. Cristales fantasmas, plagioclasas y olivinos iddingsitizados (?). Matriz (92%), completamente sericitizada y silicificada. Minerales de alteración: cuarzo secundario y sericita. Ver Figura 27

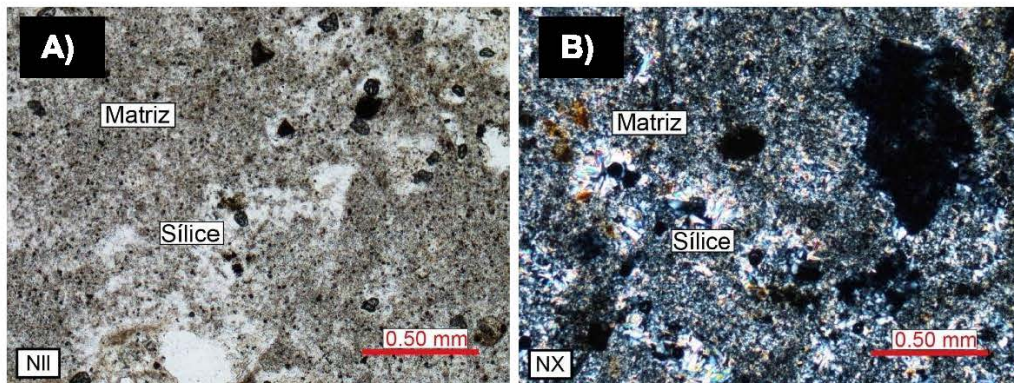


Figura 27. Fotografías de sección delgada de la muestra de andesita en estado inicial. A) Nícoles paralelos. B) Nícoles cruzados

De acuerdo a las microfotografías del análisis microestructural (Figura 28), se observan aglomeraciones de cristales amorfos de manera uniforme, planares y sin ninguna dirección preferencial, además no se observa la matriz. De acuerdo al análisis espectral (Cuadro 16), la muestra presenta concentraciones principalmente sílice y aluminio, seguido de sodio y potasio, y en menor cantidad magnesio, calcio y hierro. Sus concentraciones principales indican la presencia de una mica posiblemente muscovita como mineral de alteración, además de los silicatos presentes.

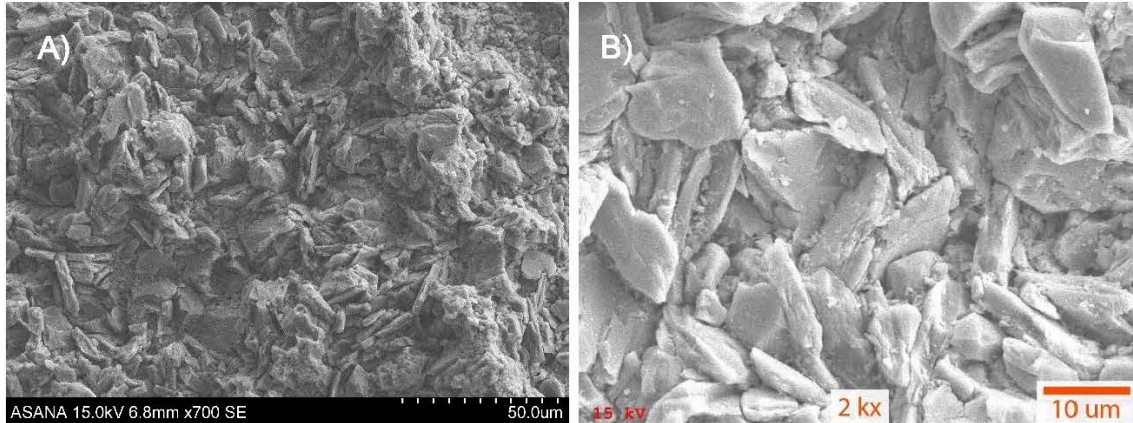


Figura 28. A) Microfotografía con aumento de x700. B) Microfotografía con aumento x2k con cristales xenomórficos, planares, sin matriz aparente.

Cuadro 16. Concentraciones de elementos que componen la andesita recrystalizada, provenientes del espectro elemental en tres sitios diferentes.

Elemento	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Promedio
	Conc. %	Conc. %	Conc. %	
O	42,07	44,83	43,50	43,47
Na	2,45	3,18	2,80	2,81
Mg	0	0,42	0,36	0,26
Al	17,76	15,05	16,14	16,32
Si	32,23	32,47	31,92	32,21
K	2,47	1,89	2,40	2,25
Ca	0	0,78	1,16	0,65
Fe	0	1,34	1,19	0,84
Ti	2,99	0	0,48	1,16

4.2 Ensayo *In Situ*


A continuación, se muestran los resultados del efecto de las condiciones del DAR en las muestras de concreto lanzado, enterrados por un periodo de 11 meses en tres sitios de la RN-27. Los tres estacionamientos donde se colocaron las muestras, presentan DAR y los valores de pH en pasta varían aún dentro de los taludes, sin embargo, todos presentan valores de $\text{pH} \leq 3$.

Los valores de cambio de masa, indican el impacto por las condiciones del sitio. Se observa que en el estacionamiento del km 48+000, es el caso más severo de DAR y el que presenta el mayor cambio de masa.

4.2.1 Estacionamiento km 38+600

En el Cuadro 17 se mostrará el dato promedio de cambio de masa en las muestras de concreto lanzado para el estacionamiento km 38+600.

Cuadro 17. Cambio de masa de las muestras en el estacionamiento km 38+600.

Código	Cambio de masa				Fotografía de la muestra posterior al ensayo y sección delgada
	M _{inicial} (g)	M _{final} (g)	% de cambio de M.	Prom %	
Estacionamiento km 38+600					
R27-01-38	269,1	257,3	-4,38	-0,71	 <p>Pátina de sulfatos</p> <p>yeso o etringita</p> <p>0,50 mm</p> <p>NII</p> <p>yeso o etringita</p> <p>0,50 mm</p> <p>NX</p> <p>R27-02-38</p>
R27-02-38	267,7	267,2	-0,20		
R27-04-38	272,7	272,9	+0,09		
R27-05-38	264,8	263,1	-0,64		
R27-06-38	266,3	270,5	+1,56		

En el estacionamiento km 38+600, la pérdida promedio de masa en las muestras fue de 0,71%. Se observó un contraste en los cambios de masa de las muestras entre el talud derecho y el izquierdo. En el primero se observó un proceso de DAR más intenso, con la ruptura de la pared de concreto lanzado, drenajes oxidados y depósitos de sulfatos al pie del talud. Las muestras colocadas en este talud tuvieron la mayor disminución de masa entre los dos márgenes; con un promedio de 2,2% menos de masa, estas presentaron una pátina gruesa de óxidos y adherencias de color amarillentas esporádicas en toda la muestra y un aumento en su diámetro promedio de 0,97% y un 1,29% en su longitud, este aumento se observa debido al crecimiento de la pátina. Estas muestras se encontraban en un sitio en apariencia más húmedo, lo que provoca un efecto más intenso y por esta razón la muestra R27-01-38 colocada en este talud, tiene una disminución en la masa de 4,04%.

El talud izquierdo, tiene un problema mayor de erosión de finos y el efecto del DAR no es intenso aún, ya que este proceso está en una etapa temprana con rocas fracturadas y alteradas hidrotermalmente. Por esta razón las muestras de concreto lanzado tienen un comportamiento de menos cambio de masa (aumento promedio de 0,34% de masa). No mostraron ninguna alteración significativa, a excepción de material del sitio adherido a la muestra como en la muestra R27-06-38 ocasionando un aumento de 1,56% de masa.

4.2.2 Estacionamiento km 47+000

En el Cuadro 18 se mostrará el dato promedio de cambio de masa en las muestras de concreto lanzado para el estacionamiento km 47+000.

Cuadro 18. Cambio de masa de las muestras en el estacionamiento km 47+000

Código	Cambio de masa				Fotografía final posterior al ensayo
	M _{inicial} (g)	M _{final} (g)	% de cambio de M.	Prom %	
Estacionamiento km 47+000					
R27-02-45	269,8	272,8	+1,12	-0,46	
R27-03-45	267,2	271,3	+1,55		
R27-04-45	270	259,1	-4,06		

Las muestras colocadas en el estacionamiento km 47+000 presentaron el menor cambio de masa con una disminución promedio de 0,46%. Se observó leve oxidación en la matriz en las muestras y solo una presentó pátina de óxidos café-rojizo que no cubría los agregados gruesos. La muestra R27-04-45 que presentó

una disminución de 4,06% de masa, se le atribuye la pérdida al desgaste de la matriz, posiblemente al estar en un sitio con mayor humedad. No se consideran cambios en las dimensiones, debido a que presentaron un aumento de menos del 1%.

4.2.3 Estacionamiento km 48+000

En el Cuadro 19 se mostrará el dato promedio de cambio de masa en las muestras de concreto lanzado para el estacionamiento km 48+000.

Cuadro 19. Cambio de masa de las muestras en el estacionamiento km 48+000

Código	Cambio de masa				Fotografía final posterior al ensayo
	M _{inicial} (g)	M _{final} (g)	% de cambio de M.	Prom %	
Estacionamiento km 48+000					
R27-01-48	267,4	277,7	+3,85	1,07	
R27-04-48	268,5	255,1	-5,00		
R27-05-48	268,3	276,7	+3,13		
R27-06-48	268,4	274,6	+2,31		

Las muestras colocadas en el estacionamiento km 48+000, presentaron un aumento de masa del 1,07%. Estas muestras en su mayoría, se caracterizaron por desarrollar pátinas gruesas de óxidos que cubren uniformemente su superficie y depósitos amarillentos en los agregados gruesos, por lo tanto el aumento en su masa. Además, se observaron fracturas rellenas por óxidos de hierro, que provienen

posiblemente de los cambios térmicos lo cuales provocan un comportamiento de contracción y dilatación, esto genera fisuras que se producen en la zona débil alrededor de los agregados gruesos. Para la muestra R27-04-48, la pérdida de la masa se debe al desgaste de la matriz que presentó la muestra, esta facilita la caída de agregados finos y medios, por lo tanto significó un 5,00% menos de masa para la muestra. En general, se observó en promedio un aumento en la longitud de la muestra de 2,98% y en el diámetro 2,09%.

En el Cuadro 20, se presenta la descripción microscópica de la muestra de concreto lanzado alterado más representativa de cada estacionamiento.

Cuadro 20. Descripción microscópica de las muestras de concreto lanzado, en su estado final.

Código	Ubicación	Descripción Microscópica
R27-02-38	Km 38+600	Líticos andesíticos y silíceos, arcillitizados y con bordes de alteración de yeso o etringita. Poca recuperación de matriz, muy oxidada, contiene fenocristales de plagioclasas augitas y vetillas rellenos con carbonatos. Fotografía (cuadro 17).
R27-04-45	Km 47+000	Líticos andesíticos y silíceos fracturados, con bordes oxidados. Fenocristales de plagioclasas. Matriz carbonatada sin alteración. Bordes oxidados en cristales fantasmas. Fotografía (cuadro 18).
R27-06-48	Km 48+000	Presenta impregnaciones de óxidos en la matriz, en las fracturas y en bordes de agregados fantasma. Líticos de grano medio volcánicos, están oxidados y presentan bordes de yeso o etringita. Los agregados silíceos no presentan alteración. Fotografía (cuadro 19).

Microscópicamente, se observó la formación de yeso o etringita principalmente alrededor de la matriz y de los agregados gruesos, los cuales se mantienen sanos en su centro. La formación de yeso, indica la reacción con la disolución ácida, de acuerdo a la reacción de la ecuación 2. Al tratarse de cristales tipo acicular y de baja

dureza, esto ocasiona el desprendimiento de los agregados y disminuye su resistencia.

De las muestras utilizadas, las del estacionamiento km 48+000, fueron las que presentaron el mayor cambio de masa. Estas muestras estuvieron expuestas a la mayor acidez en campo, con valores de pH alrededor de 2,8 y se caracterizaron por la formación de una pátina gruesa compuesta de óxidos, sulfatos y fracturas. Al estar expuestas en el talud con el efecto más severo de DAR, se realizó el análisis microestructural (Figura 29), y de los elementos presentes en la matriz de la muestra (Cuadro 21), se observa una mayor concentración de calcio y sulfuro, y en menor cantidad hierro y aluminio; se omite la del oro, ya que este se debe a la cobertura de la muestra.

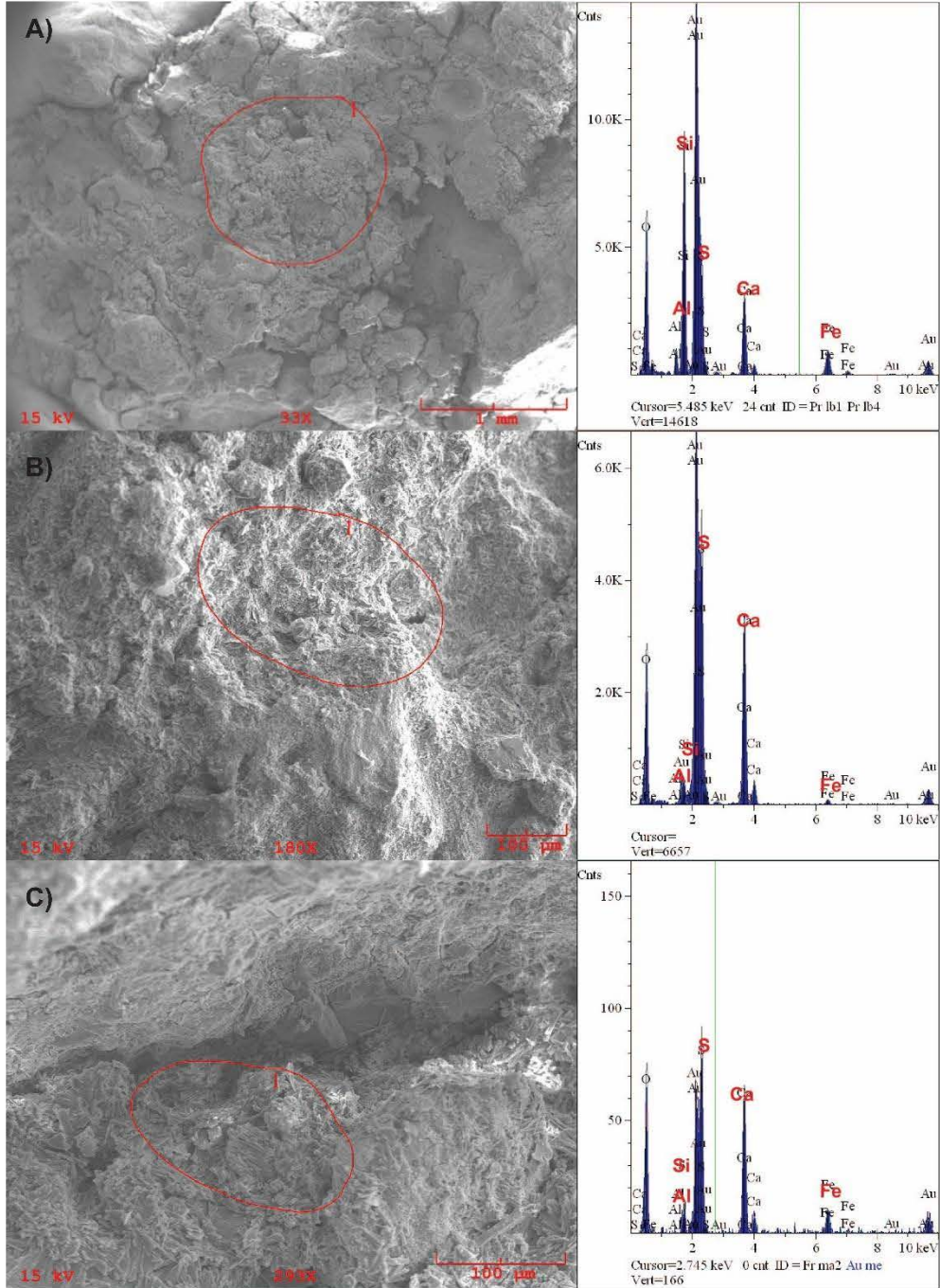


Figura 29. Microfotografía de la matriz en tres sitios diferentes. Los círculos de color rojo limitan el área del espectro elemental. A) Aumento de 33x, B) Aumento de 180x. C) Aumento de 290x, de una muestra del ensayo *In Situ* del estacionamiento km 48+000.

Cuadro 21. Concentración de elementos del espectro elemental de acuerdo a la Figura 29

Elemento	Sitio A) Conc. %	Sitio B) Conc. %	Sitio C) Conc. %	Promedio Conc. %
O	15,84	10,99	14,07	13,63
Al	0,82	0,059	0,08	0,32
Si	7,79	0,63	0,60	3,01
S	5,46	6,02	10,36	7,28
Ca	5,59	6,62	10,75	7,66
Fe	5,01	3,12	0,89	3,01
Au	59,47	72,54	63,24	65,09
Total	100,00	100,00	100,00	

Se observaron micro-fracturas y la formación de cristales de yeso y etringita en los bordes de los agregados gruesos y dentro de las vesículas, evidenciado por la alta concentración de azufre, calcio, aluminio y sílice, como se observa en la Figura 30.

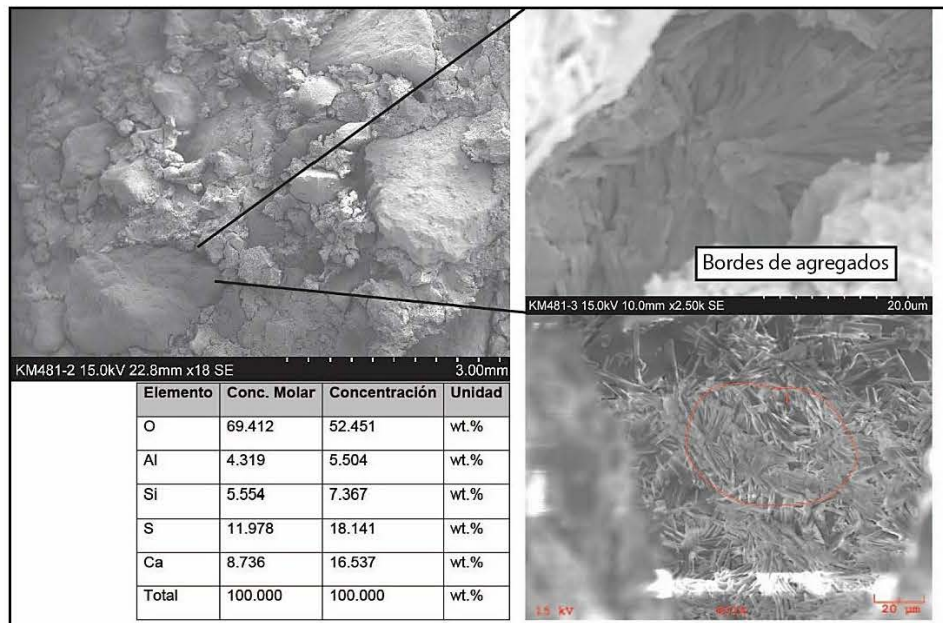


Figura 30. Se observó la formación de cristales prismáticos de yeso y etringita en los bordes de los agregados.

En los tres estacionamientos, no hubo ningún tipo de abrasión que afectara las muestras y que estimulara la caída de los granos, sin embargo, la disminución de la masa se debió a la degradación de la matriz por la reacción del componente calcáreo con las aguas ácidas con las que entró en contacto, y los agregados gruesos se ven afectados solo en los bordes en contacto con el cemento, ya que al estar compuestos en su mayoría de andesitas y cuarzo, de acuerdo a lo observado microscópicamente presentaron bordes de oxidación y de sulfatos de calcio.

4.3 Ensayo de Ciclo Continuo

A continuación, se muestran los resultados del ensayo Ciclo Continuo de los tres tipos de muestra utilizados (concreto lanzado, brecha volcánica y andesita); expuestos a disoluciones ácidas con valor de pH 2,0 y pH 4,0, por un periodo de 85 días. En la Figura 31, se presenta un infograma con los datos de cambio de masa, transformación en las características y descripción mineralógica.

ENSAYO CICLO CONTINUO

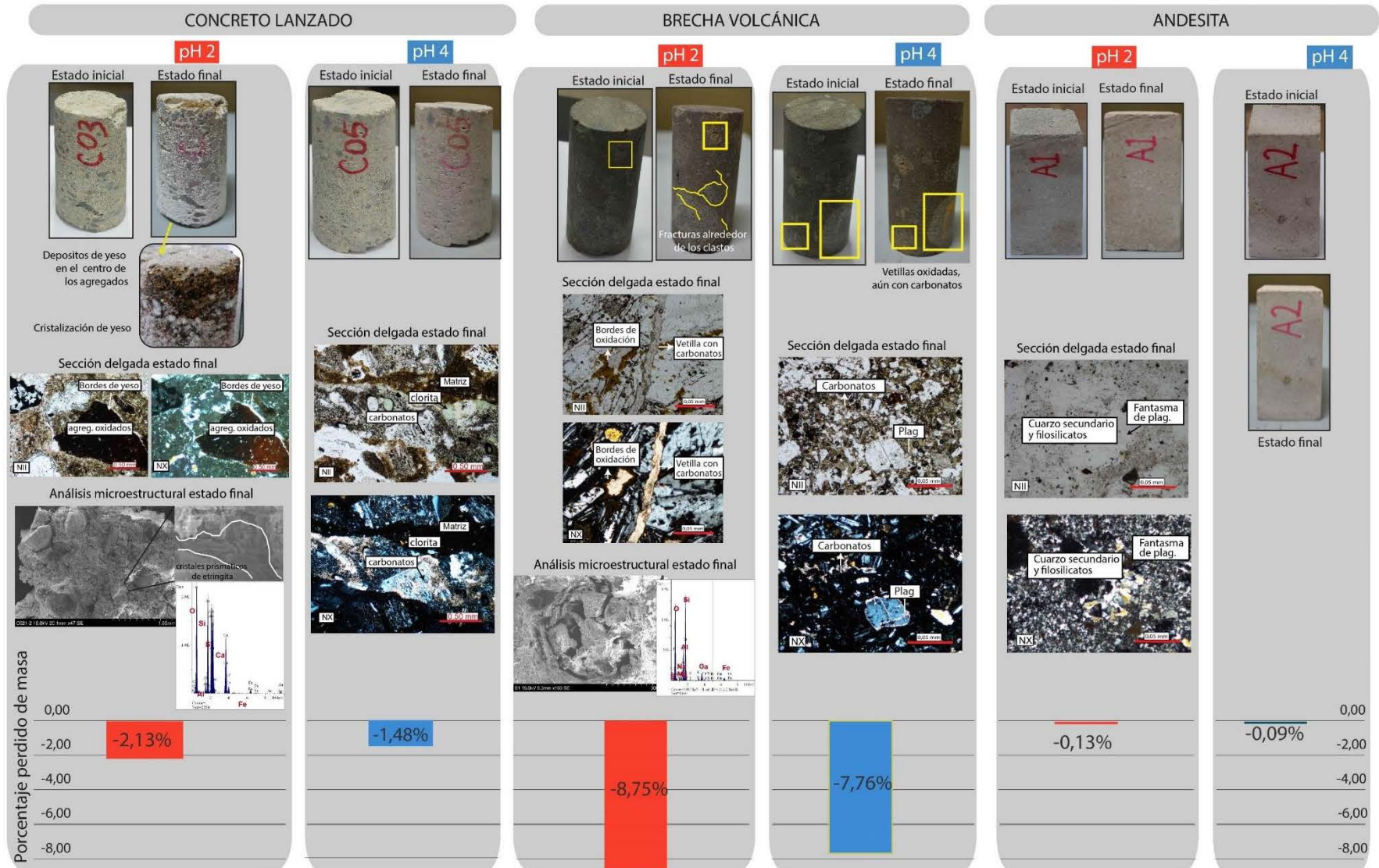


Figura 31. Información de cambio de masa del ensayo Ciclo Continuo

Concreto Lanzado – Ensayo Ciclo Continuo

En el Cuadro 22, se describen los cambios de masa, dimensiones y volumen de las muestras de concreto lanzado expuestas a disolución ácida con valor de pH 2 y pH 4 en el Ciclo Continuo por un periodo de 85 días.

Las muestras presentaron mayores cambios en la masa y en las propiedades mineralógicas, de lo contrario, en las dimensiones no mostraron cambios significativos.

Cuadro 22. Descripciones de las muestras de concreto lanzado sumergido en disolución ácida con valor pH 2 y pH 4.

Concreto Lanzado		
Valor pH	Cambios	Observaciones
2	Masa: - 2,13%	<p>Al inicio del experimento los agregados finos se observaron oxidados y con tonalidades naranjas. Posteriormente, las muestras presentaron desgrane de agregados medianos, seguido de la precipitación de una capa de depósitos de color blancuzco, amorfo y suave, distribuido de manera irregular en la superficie de la muestra y en la base del recipiente. Después esta capa, se cristalizó a yeso con hábito radial, distribuidos de manera irregular en la superficie</p> <p>El desgaste en la matriz expone los agregados medios y gruesos. Al secar la muestra, se formó una pátina color blanco, que rellena la matriz entre los agregados medianos y gruesos se adhirió a la muestra, y se originaron fisuras que provocaron la caída de algunos agregados gruesos de la parte superior.</p>
	Volumen: - 5,31%	
	Dimensiones: +1,24% diámetro. +1,39% longitud	
4	Masa: - 1,47%	<p>El efecto inicial fue la oxidación de los agregados finos, que se observaron con tonalidades naranja. Posteriormente, se observó la formación de cristales de yeso fino, adheridos al recipiente de vidrio y otros residuos finos en la base del recipiente.</p>
	Volumen: - 3,06%	
	Dimensiones: +0,11% diámetro. -0,41% longitud	<p>En general, no se observan cambio significativo, además de la oxidación de los agregados finos.</p>

Las muestras de concreto lanzado expuestas a la disolución ácida con pH 2, presentan mayores cambios en sus propiedades que la muestra inmersa en disolución con pH 4.

Debido a que el pH 2 es el valor más ácido, se comporta de manera agresiva al contacto con los componentes calcáreos que están en el cemento de las muestras de concreto.

La pérdida de masa se debe por la reacción del ácido con el componente calcáreo de la muestra, el cual produce un desgaste que profundiza en la matriz de la superficie y provoca el desprendimiento de los agregados, que no reaccionan al ácido y la cristalización del yeso en la superficie de la muestra. Al no haber sido afectadas por abrasión durante la realización del experimento, desarrollaron una pátina gruesa de sulfatos de calcio, que para efecto de corte de la muestra, la mantiene completamente unida y no se desmorona. Además, las fisuras y la caída de agregados gruesos en la parte superior de la muestra, se deben al efecto de contracción y dilatación que generan los cambios térmicos. Esto se refleja también en la reducción en su volumen.

Se realizó un control diario de los cambios de pH y se verificó que este varía de acuerdo con la concentración de los carbonatos que reaccionen con el ácido, en un periodo de 24 horas. A menor acidez, la disolución de carbonatos es más leve y a mayor acidez este disuelve con mayor eficacia los carbonatos por lo tanto, el pH se estabiliza.

En este caso, la disolución con valor de pH 2 presentó una estabilización gradual a lo largo del periodo. Conforme el ácido consume el componente calcáreo de la muestra y se observa un desgaste en la matriz de la superficie, existe menos variación en el pH, ya que disminuyen los carbonatos de la superficie, y la disolución adquiere un comportamiento estable en el pH original indicado (Figura 32).

En las muestras de concreto lanzado expuestas a disolución ácida con valor de pH 4, la única alteración observada es la oxidación de algunos agregados finos. Al ser una disolución con baja acidez, la reacción con el componente calcáreo ocurre de manera más lenta y no se observa un efecto significativo sobre la muestra en el periodo de tres meses, sin embargo, se considera que a mayor tiempo de exposición mayor será el efecto. Para todo el periodo del ensayo, cada 24 horas, el pH valor 4 aumentaba a valor máximo de pH 12.

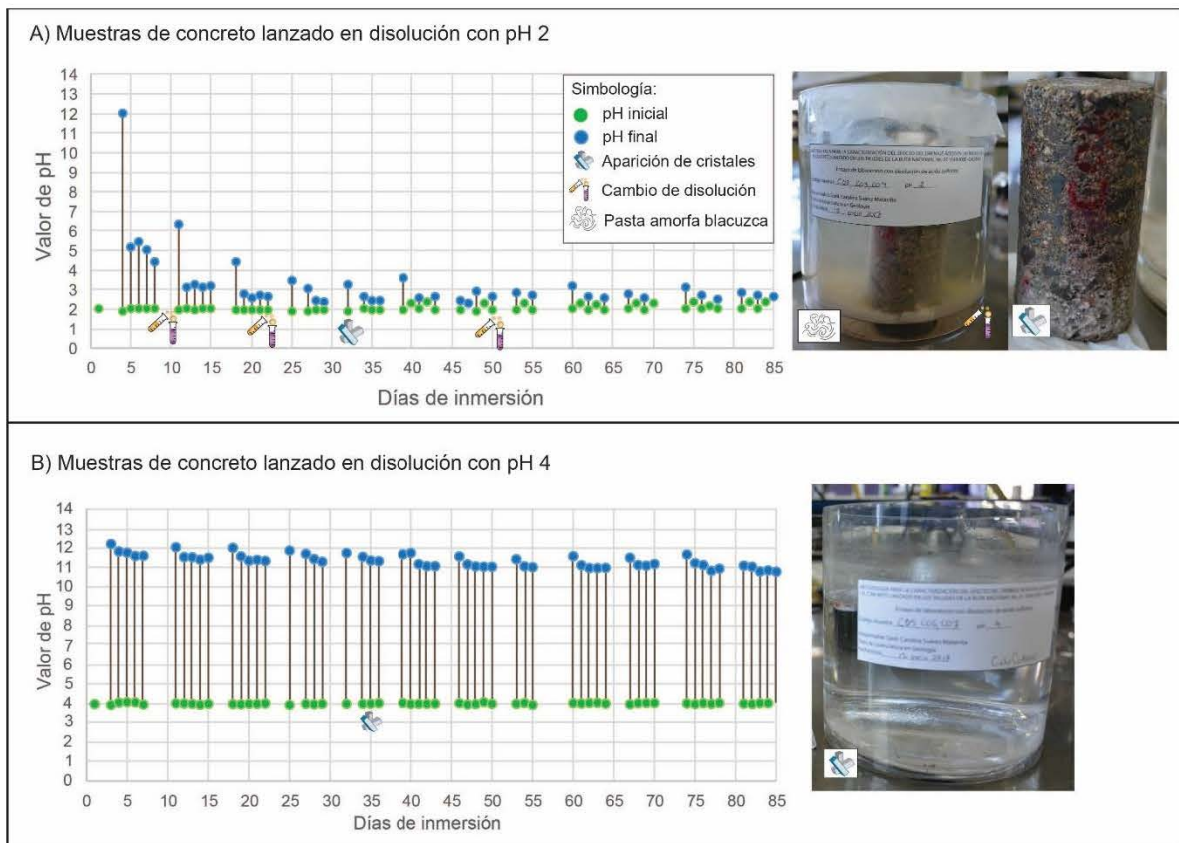


Figura 32. Cambios diarios en el valor de pH de la disolución en contacto con las muestras de concreto lanzado en el ensayo de Ciclo Continuo. A) Disolución con pH 2. B) Disolución con pH 4.

Los principales cambios mineralógicos ocurrieron en las muestras de concreto lanzado inmerso en disolución con pH 2, donde se observan bordes y vetillas rellenas de yeso o etringita, producto de la reacción de los carbonatos con el ácido sulfúrico. Para la muestra inmersa en pH 4, hay presencia de carbonatos de la matriz, por lo tanto no hay ninguna alteración por el ácido. En el Cuadro 23 se describe microscópicamente cada muestra.

Cuadro 23. Descripción microscópica de las muestras de concreto lanzado inmersas en disolución ácida en el Ciclo Continuo

Código	Valor de pH	Descripción Microscópica
C02	pH 2	Lítics de grano grueso y medio, algunos fracturados con impregnaciones de óxidos, bordes de yeso o etringita. Matriz con espacios vacíos de color amarillento. Ver Figura 33.
C05	pH 4	Lítics de grano grueso y medio, con minerales corroídos e impregnaciones de óxidos, sin borde de reacción. Matriz con desgaste y muchos espacios vacíos. Trazas de clorita. Ver Figura 34.

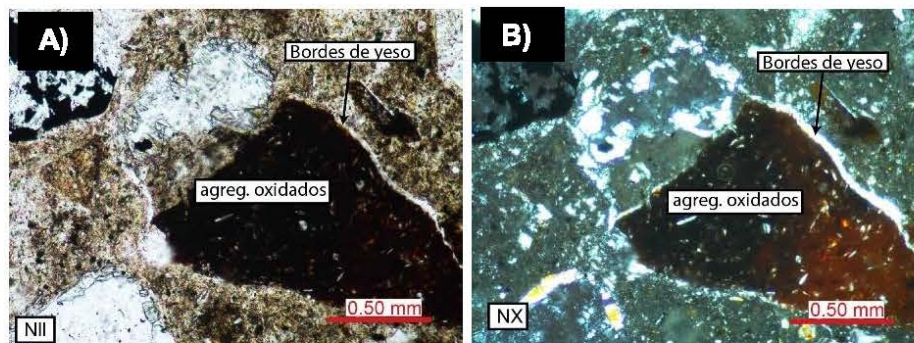


Figura 33. Fotografías de sección delgada de muestras de concreto en el Ciclo Continuo inmerso en disolución con pH 2. A) Nícoles paralelos. B) Nícoles cruzados.

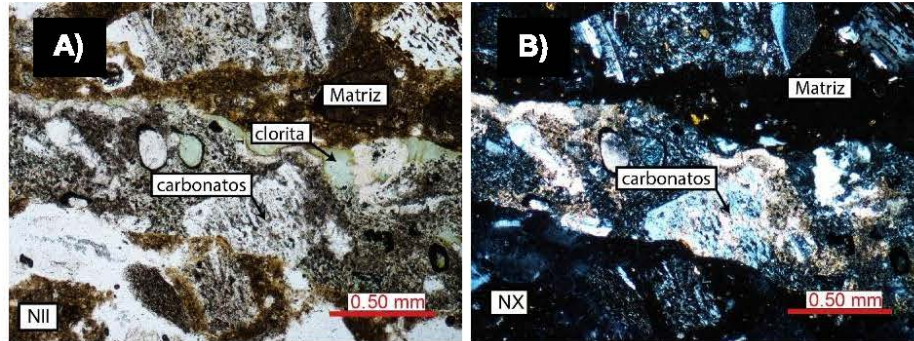


Figura 34. Fotografías de sección delgada de muestras de concreto en el Ciclo Continuo inmerso en disolución con pH 4. A) Nícoles paralelos. B) Nícoles cruzados.

Se realizó el análisis microestructural de la muestra expuesta a la disolución ácida con pH 2. Esta presenta una mayor concentración en calcio, azufre y sílice, y en menor cantidad aluminio y hierro, indicando la presencia de etringita, la misma que se encuentra en la sección B de la (Figura 35), en los bordes de los poros, formando cristales prismáticos.

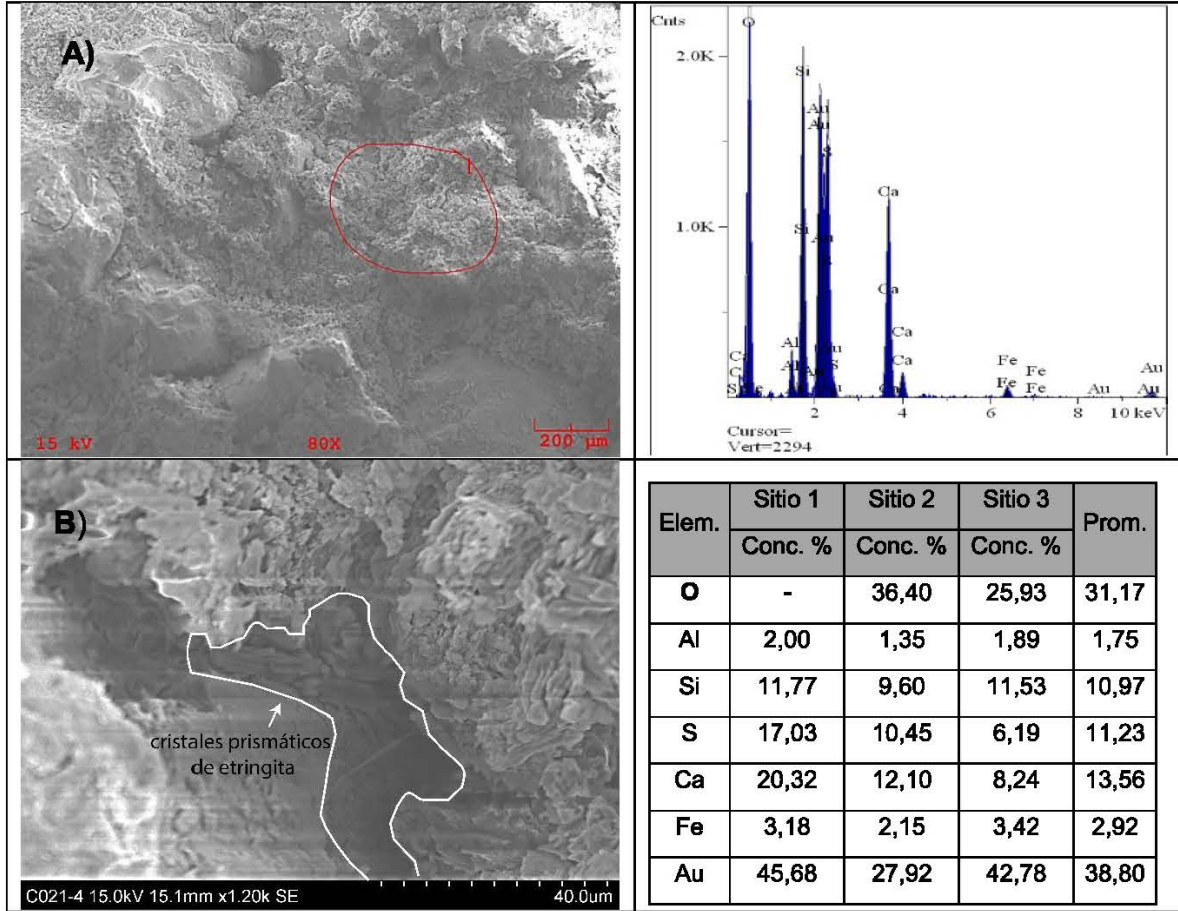


Figura 35. Microfotografías del concreto lanzado expuesto a disolución pH 2. A) Textura superficial, con su respectivo espectro elemental, aumento de 80X. B) Cristales etringita, dentro de poros y bordeando los agregados, aumento de x1.20k

Brecha volcánica – Ensayo Ciclo Continuo

En el Cuadro 24 se presentan los cambios de masa, dimensiones y densidad de las muestras de brecha volcánica expuestas a disolución ácida con pH 2 y pH 4 en el Ciclo Continuo por un periodo de 85 días.

Cuadro 24. Descripciones de las muestras de brecha volcánica sumergido en disolución con valor pH 2 y pH 4.

Brecha volcánica		
Valor de pH	Mediciones	Observaciones
2	Masa: -8,75%	Se observó, desprendimiento de material mediante el depósito de residuos finos en el recipiente, los cuales aumentan su cantidad a lo largo del ciclo.
	Volumen: -7,64%	A mediados del periodo se observaron residuos de yeso finos adheridos al recipiente y poca cantidad sobre la muestra.
	Dimensiones: -0,19% diámetro. -0,21% longitud	Posteriormente, se observaron fracturas en disposición irregular, alrededor de los agregados gruesos, los cuales poco a poco se fueron profundizando con el tiempo. Las dimensiones no tuvieron cambios significativos.
4	Masa: -7,76%	Inicialmente se observó cristales milimétricos oxidados con tonalidades naranja. Posteriormente, se observaron vetillas con las mismas tonalidades, junto con las plagioclasas de los clastos de andesita, además de depósitos de residuos finos en el recipiente. Los clastos presentaron una pátina de oxidación.
	Volumen: -5,78%	
	Dimensiones: -0,23% diámetro. -0,48% longitud	

La muestra de brecha volcánica sumergida en disolución de pH 2, tuvo una disminución de masa de 8,75%. En el recipiente en que estaba contenida se observaron residuos finos y la formación de cristales muy pequeños e incoloros sobre la muestra (posiblemente yeso), además de la formación de fracturas en los bordes de los clastos. La pérdida de masa se refleja en la disminución del volumen

por la disolución u oxidación de los componentes carbonatados, dejando vesículas vacías en la superficie de la muestra.

Esta muestra se identificó por ser dura y muy heterogénea en el tamaño de sus clastos y con poca porosidad, características que impiden la saturación de la misma, por lo tanto el efecto del ácido no profundizó la superficie, y se observó la oxidación de las plagioclasas expuestas, debido al contacto directo con el ácido.

La disolución ácida en la que está inmersa la brecha volcánica presenta un cambio inicial por encima del valor de pH 4, en su primera inmersión, donde consumió la mayoría de los carbonatos de la superficie, y continúa el resto periodo de manera estable (Figura 36).

Para el valor de pH 4, la muestra tuvo una pérdida de 7,76%, con un efecto mínimo de oxidación de las vetillas expuestas en ella. Se considera que la reducción de la masa de la muestra se debe a la caída de material fino adherido y no por la oxidación o caída de material proveniente de la muestra como tal, ya que se observa una leve reacción con el ácido, en el cual se mantiene constante hasta llegar a la estabilización, es decir, poca concentración de carbonatos en la superficie.

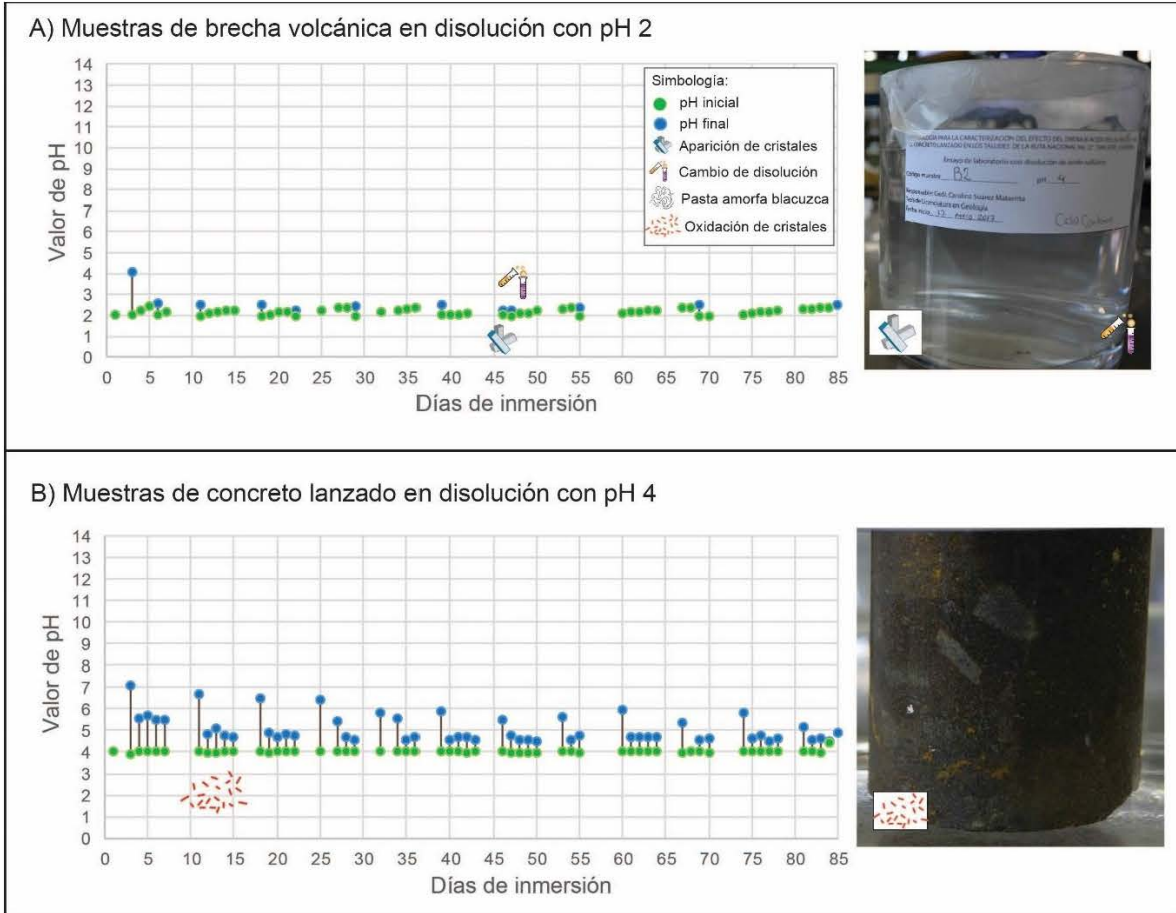


Figura 36 Cambios diarios en el valor de pH de la disolución en contacto con las muestras de brecha volcánica en el ensayo de Ciclo Continuo. A) Disolución con pH 2. B) Disolución con pH 4.

Las muestras no presentan cambios mineralógicos importantes y se observan vetillas y bordes en clastos rellenos de carbonatos que no fueron afectadas por la disolución ácida. En el Cuadro 25 se analizan microscópicamente cada muestra.

Cuadro 25. Descripción microscópica de la muestra de brecha volcánica expuestas a disolución con pH 2 y pH 4.

Código	Valor de pH	Descripción Microscópica
B1	pH 2	Clastos (70%) andesíticos con fenocristales de: plagioclasas con fracturas y textura cribosa. Augitas, fracturados e iddiginitizados. Opacos. Cristales fantasma, con bordes café arcilla (?) y alterados por carbonatos. Matriz (30%) microcristalina con microlitos de plagioclasas y augitas. Minerales de alteración: arcilla y carbonatos. Veta rellena de carbonatos. La muestra presenta una matriz gruesa. Ver Figura 37.
B2	pH 4	Clastos (60%) andesíticos, con fenocristales de: plagioclasas con textura cribosa, glomeroporfirítica, algunos opacitizados. Augita, algunos iddigitizados y opacitizados, con textura ofítica y fracturados. Opacos. Matriz (40%) microlitos de plagioclasa y augita, rodeado de arcilla. Presenta vetillas de carbonatos e impregnaciones de hierro. Ver Figura 38.

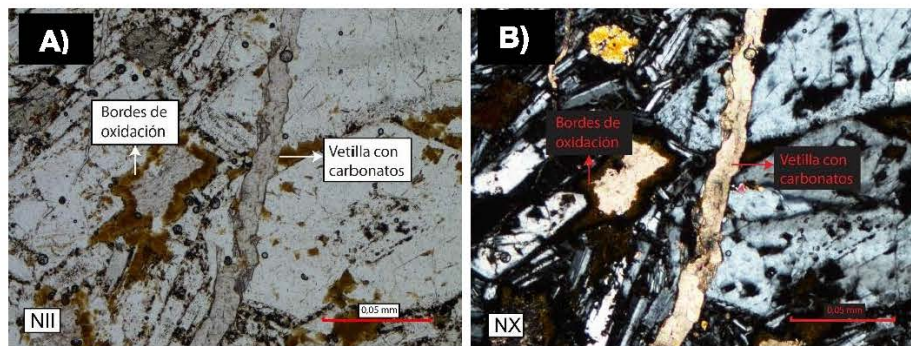


Figura 37. Fotografías de sección delgada de muestras de brecha en el Ciclo Continuo inmerso en disolución con pH 2. A) Nícoles paralelos. B) Nícoles cruzados.

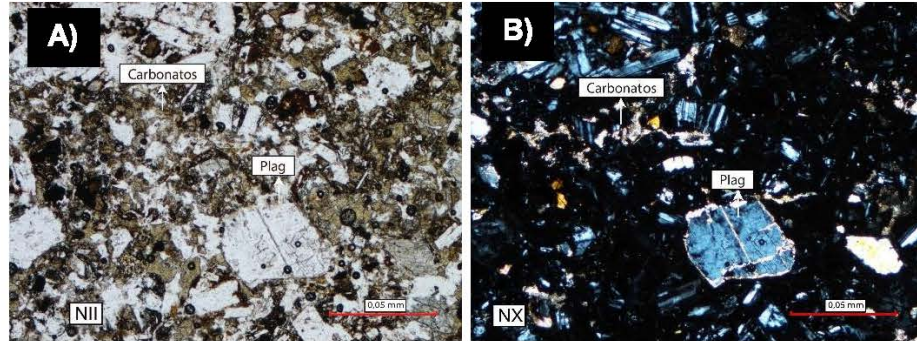


Figura 38. Fotografías de sección delgada de muestras de brecha en el Ciclo Continuo inmerso en disolución con pH 4. A) Nícoles paralelos. B) Nícoles cruzados.

Se realizó un análisis microestructural de la muestra inmersa en disolución de pH 2 y de acuerdo a sus resultados (Figura 39), se observa mayores concentraciones de sílice, aluminio, hierro y calcio. La concentración de calcio evidencia que los carbonatos no fueron disueltos en su totalidad. Al ser una roca sumamente heterogénea y de textura gruesa, se dificulta la comparación con el estado inicial, ya que son sitios de análisis diferentes.

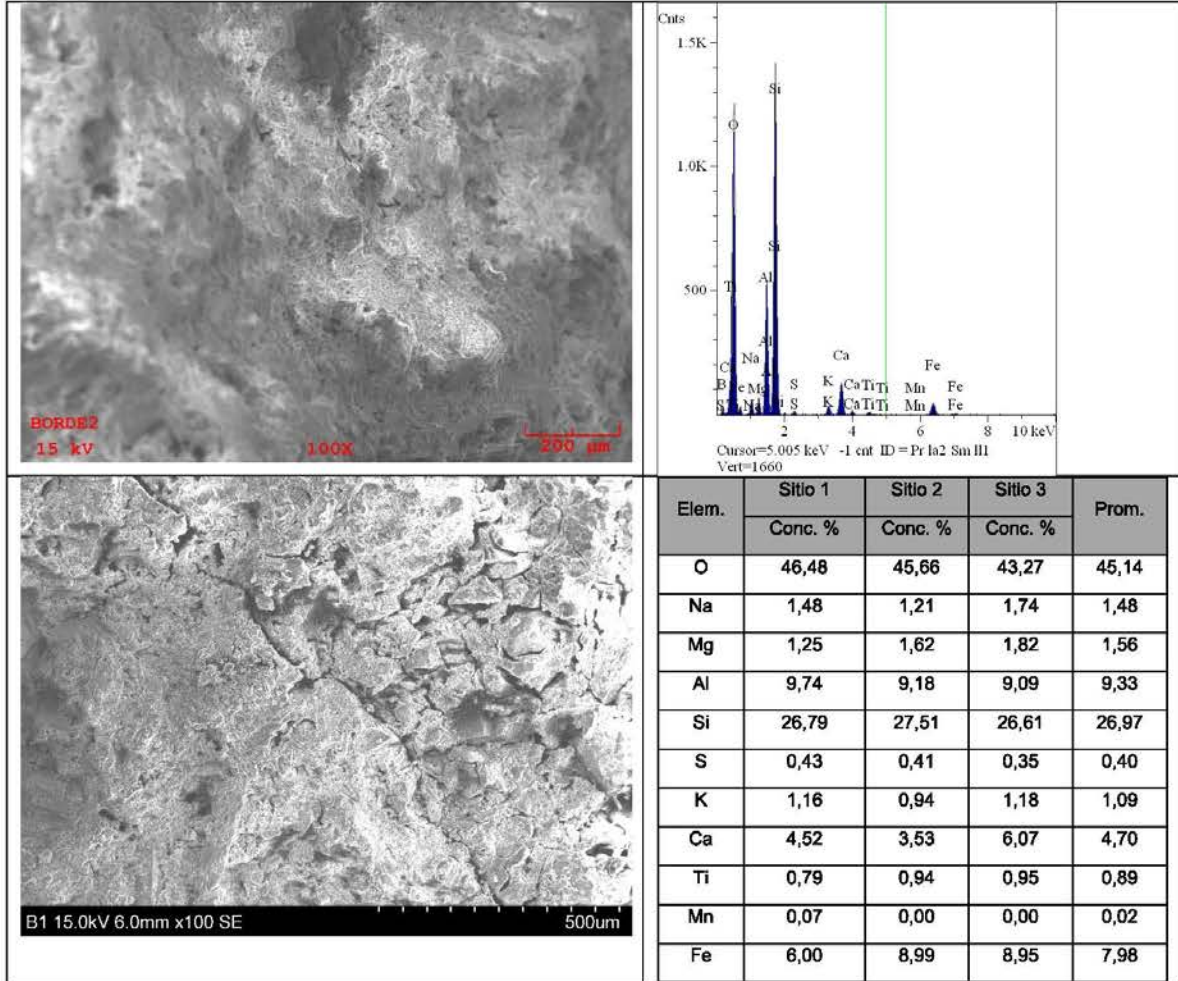


Figura 39. Microfotografías. A) Aumento de 100X, textura superficial, con su respectivo espectro elemental B) Aumento de 100X, micro-fracturas de la matriz.

Andesita – Ensayo de Ciclo Continuo

A continuación, en el Cuadro 26 se presentan los cambios en las propiedades de la muestra de andesita expuesta a disoluciones con valor de pH 2 y pH 4, en el ensayo de Ciclo Continuo.

Cuadro 26. Descripciones de las muestras de andesita sumergido en disolución con valor pH 2 y pH 4.

Andesita			
Valor de pH	Mediciones	Observaciones	Análisis
2	Masa: -0,13%	No mostraron ningún cambio o alteraciones	No mostraron ningún cambio de valor de pH en el periodo del ensayo.
	Volumen: +2,05%		
	Dimensiones: -0,16% diámetro. -0,11% longitud		
4	Masa: -0,09%	No mostraron ningún cambio o alteraciones	No mostraron ningún cambio de valor de pH en el periodo del ensayo.
	Volumen: +2,46%		
	Dimensiones: +0,12% diámetro. +0,06% longitud		

Debido a la composición mineralógica de la muestra de andesita recristalizada a sericita y sílice, esta no contiene ningún componente que reaccione con ácido sulfúrico. Por lo tanto, el valor de pH se mantiene estable durante todo el periodo (Figura 40).

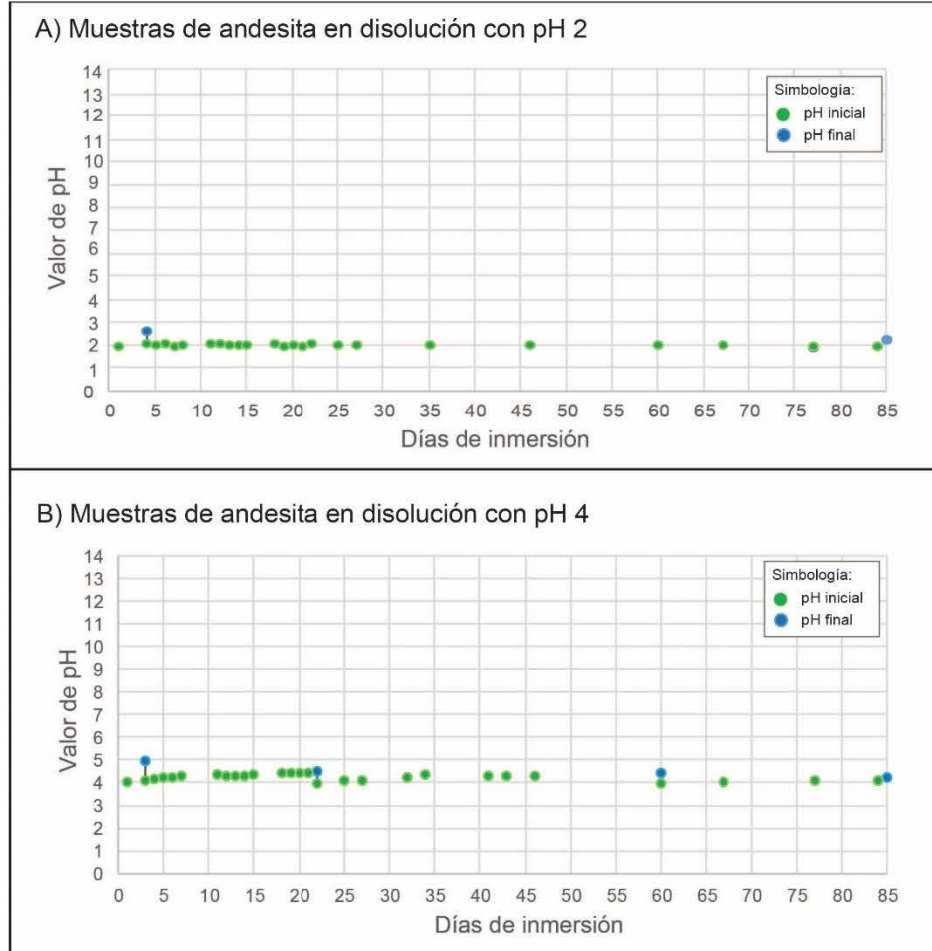


Figura 40. Cambios diarios en el valor de pH de la disolución en contacto con las muestras de andesita en el ensayo de Ciclo Continuo. A) Disolución con pH 2. B) Disolución con pH 4.

4.4 Ensayo de Ciclo Alternado

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de Ciclo Alternado. Está dividido en cinco ciclos con diferencias temporales, con el objetivo de observar los cambios iniciales con mayor rapidez antes de la estabilización. Cada ciclo se dividirá en tres principales etapas; inicial, medio y final, como se muestra en la Figura 41. Posteriormente, se presentarán las observaciones y los resultados de los cambios de masa, dimensiones y características mineralógicas de cada etapa del ciclo para cada tipo de muestra.

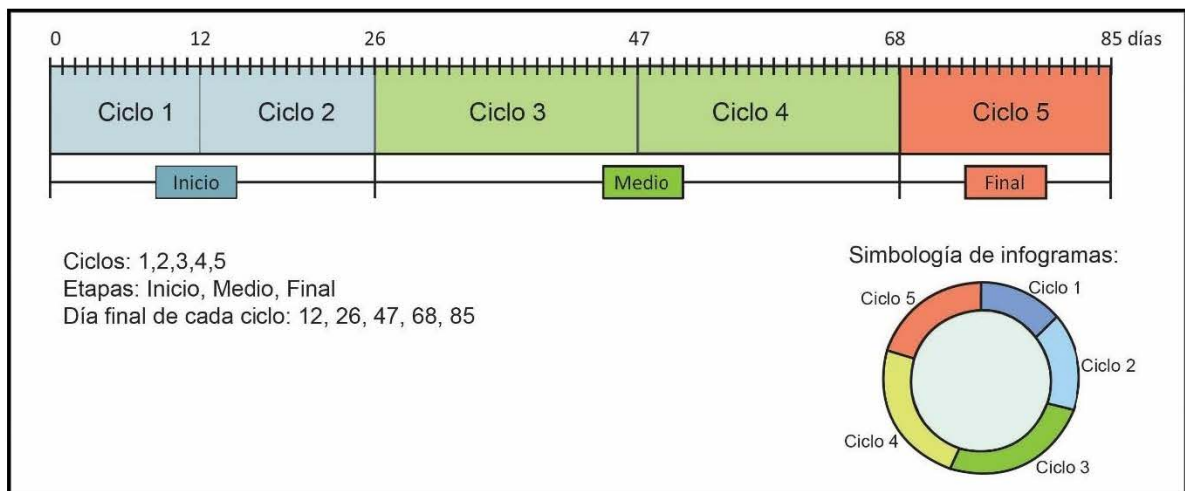


Figura 41. Línea cronológica con división de ciclos y etapas para el ensayo del Ciclo Alternado.

4.4.1 Muestras sumergidas en disolución con valor de pH 2

En la Figura 42, se muestran los resultados y la evolución de los cambios en la masa y en las características desde el estado inicial hasta el estado final de los tres tipos de muestra. Cada gráfico está dividido en los cinco ciclos, y cada ciclo presenta el valor del cambio de la masa.

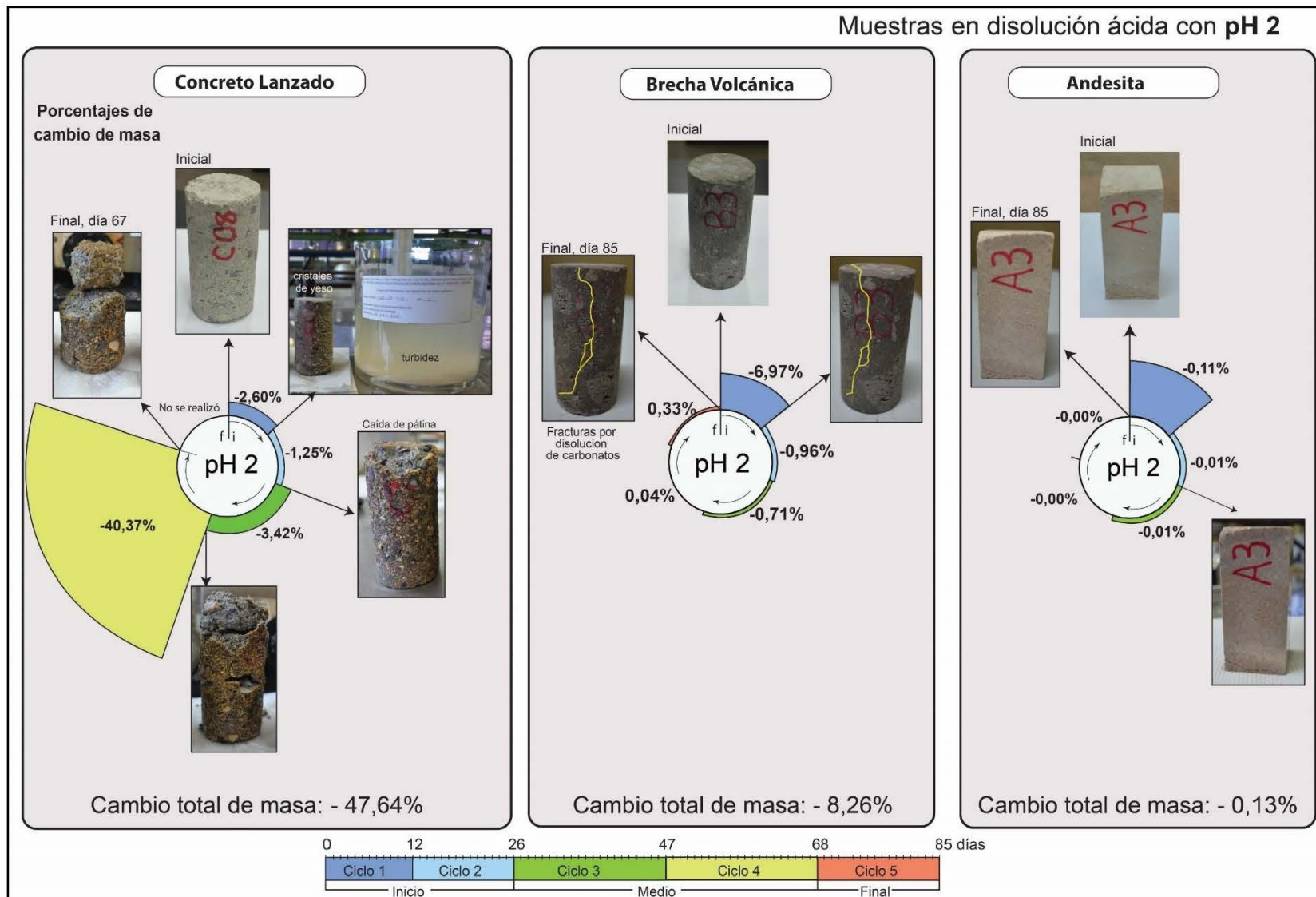


Figura 42. Información sobre cambio de masa para los tres tipos de muestra inmersas en disolución ácida con pH 2, en el ensayo Ciclo Alternado.

Concreto lanzado – Ensayo Ciclo Alternado pH 2

En el Cuadro 27, se observan las medidas y observaciones de las muestras de concreto lanzado que fueron inmersas en disolución ácida con pH 2.

Cuadro 27. Medidas y observaciones del ensayo de Ciclo Alternado con una disolución ácida de pH 2.

Concreto lanzado		
Periodo	Medición	Observaciones
Inicial (día 1 al día 26)	Masa: -3,89%	Al inicio los agregados finos se oxidaron y presentaron tonalidades naranja. Hubo desgaste en la matriz y caída de granos gruesos en la base del recipiente. Se observó el depósito de un material suave, amorfo color blancuzco, tanto agrupados como dispersos por la superficie de la muestra.
	Dimensiones: +0,06% diámetro -0,30% longitud	Se originaron fisuras a lo largo de la circunferencia superior y la superficie se desgranó al contacto con los dedos. Disolución con aspecto turbio, con depósitos de material suave blanco en la base del recipiente y un mal olor a podrido.
Medio (día 27 al día 68)	Masa: -43,8%	El desgaste superficial y la formación de grietas se intensificaron. Las fisuras se abrieron y provocaron la caída de material, ocasionando una disminución importante en la circunferencia superior, donde se observó crecimiento de cristales de yeso. Las muestras presentaron una matriz de color naranja desgastada exponiendo agregados gruesos que se desgranaba fácil. Se formó yeso con hábito acicular en la matriz (Figura 43), en las grietas y en los agregados. Se formó una pátina de 8,5 mm de espesor, que por las grietas en la circunferencia de la superficie superior provocó la separación de esta.
	Dimensiones: -8,75% diámetro -11,05% longitud	Para el ciclo 4, la muestra se fracturaba y desgranaba con facilidad. Se observaron grietas abiertas paralelas al diámetro, estas expandieron y separaron la pátina de 3 a 5 mm de espesor del centro del núcleo (Figura 43). Esta pátina separada del núcleo estaba sellada por yeso y sulfatos que la mantienen juntas. Las muestras se parten y exponen superficie nueva de concreto al ácido, debido a las grietas. La parte interna del núcleo está afectada por la humedad, es suave y con el mismo tono gris que caracteriza el concreto y se observa el anillo de desgaste de la pátina, además los agregados finos se observan oxidados con tonos naranjas. En estos sitios se observa una pátina naranja en las superficies. El agregado grueso no fue afectado por esta actividad.
Final (día 69 al día 85)	No hay mediciones	En el día 67 se detuvo el experimento debido al intenso desgaste que presentaba. Por esta razón no se tomaron las medidas de volumen y densidad.
Total	Masa: -47,64%	Dimensiones: -8,69% de diámetro, -11,35% de longitud

En el periodo inicial, se observó principalmente la formación de un material blancuzco, suave y amorfo en todo el recipiente y sobre la muestra (Figura 42), como producto inicial de la reacción del ácido sulfúrico con el componente calcáreo. En esta etapa hubo una pérdida total de 3,89% en la masa.

En la etapa media, las muestras presentaron cambios drásticos y tuvieron una pérdida de masa total de 43,8%. Caracterizada por la desintegración de la mayor parte del núcleo, y la abertura de grietas profundas, siendo los agregados los que resistieron al efecto del ácido. Se observó la cristalización de yeso y posteriormente la formación de una pátina de sulfatos de 8,5 mm de espesor, que se desprende con facilidad debido a las grietas en la circunferencia superior de la muestra. Se formaron dos diámetros diferentes en la zona superior, con una reducción de 1 cm de la pátina y una expansión de 0,5 cm por las pátinas laterales (Figura 43). En total, las dimensiones tuvieron una de reducción de 8,69% del diámetro y 11,35% de la longitud.

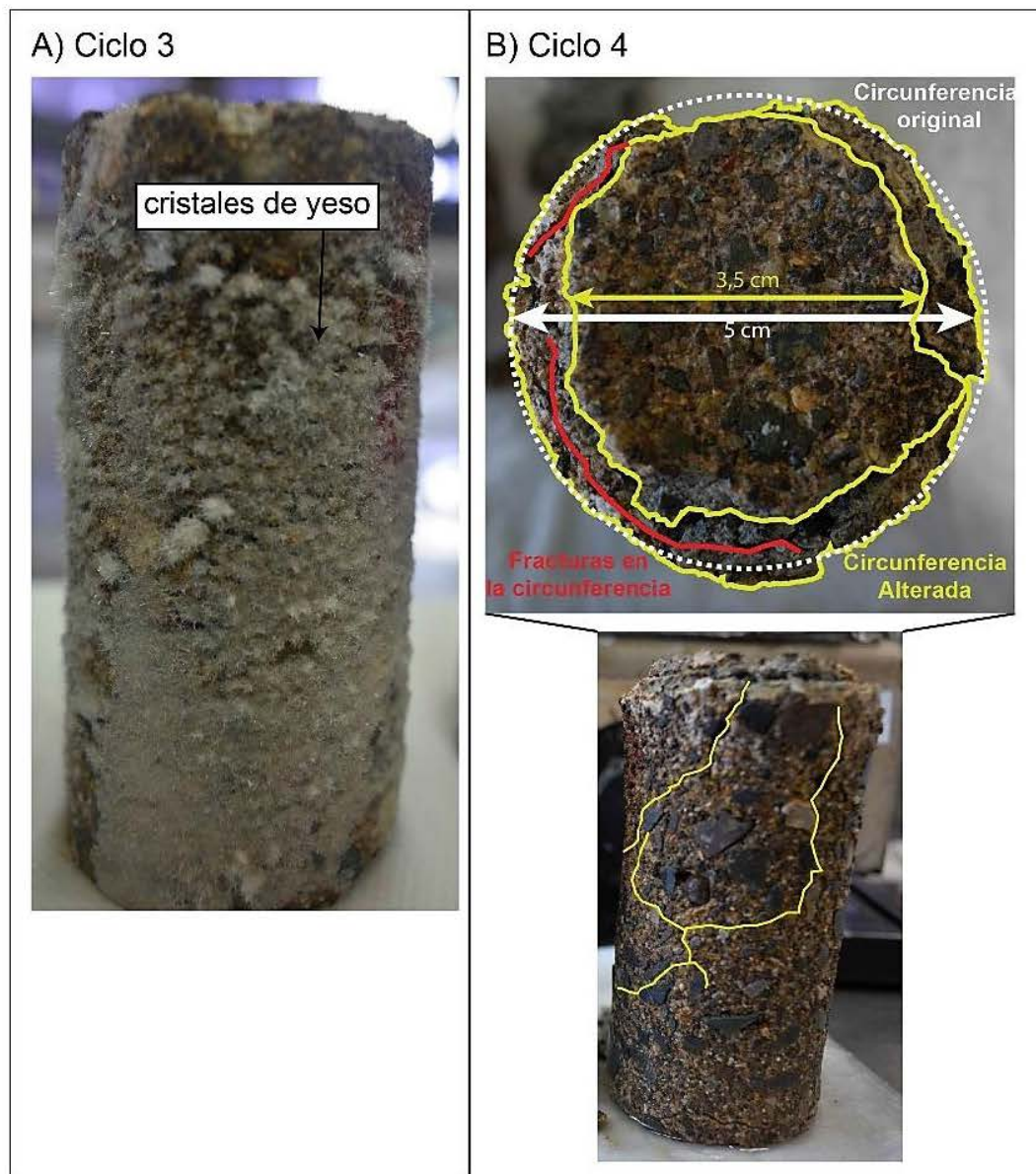


Figura 43. A) Cristalización de yeso en la superficie de la muestra de concreto lanzado, en el ciclo 3. B) Cambio de las dimensiones del diámetro superior, por la degradación del material y formación de la pátina, en el ciclo 4.

Posterior al secado de las muestras en el horno, se observó la aparición de grietas, que se formaron principalmente por los cambios térmicos que provocan dilatación y contracción en la muestra. Con la abertura de estas, la disolución entra en contacto con concreto sano y este reacciona, aumentando el valor de pH 2, hasta un valor de máximo de pH 12, lo que resulta en una disolución completamente básica en menos de 24 horas (Figura 44). Al final del ciclo 4, el día 67, debido al severo desgaste que presentaron las muestras, se procedió a finalizar el ensayo y hacer las mediciones finales, en un cuerpo con al menos una masa superior al 33 % de la original.

En la Figura 44, se observa para la disolución en la que está inmersa el concreto lanzado, una variación de pH donde en los primero 3 ciclos, hay una tendencia a la estabilización debido a la disminución del componente calcáreo que el ácido ha consumido en superficie. El ciclo 4, corresponde con la fracturación severa del material el cual provoca que la disolución entre en contacto superficie que no ha sido afectada y reacciona fuertemente con el ácido.

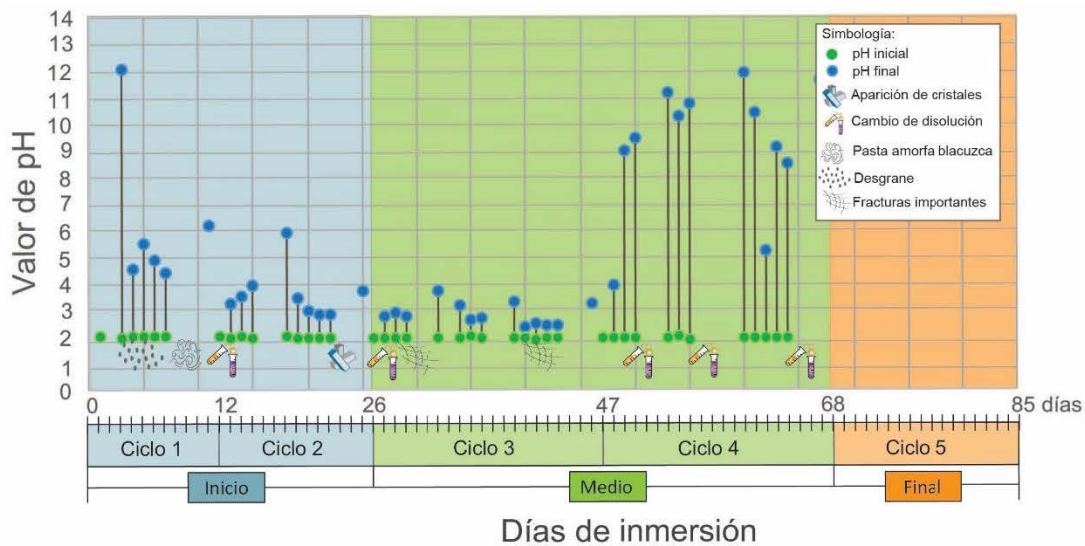


Figura 44. Cambios en el valor de pH 2 de la disolución en contacto con las muestras de concreto lanzado en el ensayo de Ciclo Alternado.

De acuerdo con el análisis espectral y mineralógico en la matriz de la muestra, se obtiene concentraciones de principalmente calcio, azufre y aluminio. En la sección B de la Figura 45, los cristales dentro de una fisura presentan una alta concentración de sílice, calcio y hierro y en menor cantidad el azufre. En las microfotografías se observaron cristales en forma acicular, típicos de la etringita, de igual manera estos cristales se encuentran al borde de los agregado gruesos. Microscópicamente, la muestra presenta agregados andesíticos y silíceos con impregnaciones de óxidos y

algunos fracturados con bordes de alteración rellenos de etringita, dentro de una matriz recristalizada (Figura 45C).

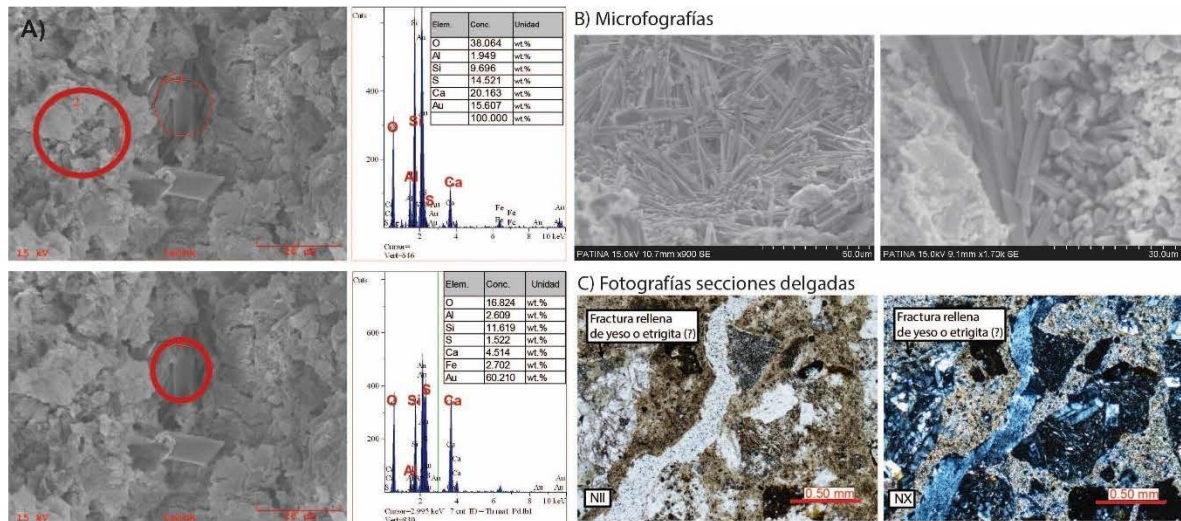


Figura 45. A) Analisis espectral de dos sitios de la muestra. B) Microfotografías de cristales de etringita. C) Fotografías de las secciones delgadas de una de las muestras de concreto lanzado.

Brecha volcánica – Ensayo Ciclo Alternado pH 2

En el Cuadro 28, se mostraran las medidas y observaciones de las características de las muestras de brecha volcánica, que fueron sumergidas en disolución ácida con pH 2.

Cuadro 28. Medidas y observaciones de la muestra de brecha volcánica en el ensayo de Ciclo Alternado con una disolución ácida de pH 2.

Brecha volcánica			
Periodo	Mediciones	Observaciones	
Inicial (día 1 al día 26)	Masa: -7,93 %	La brecha volcánica presentó el mayor cambio de masa en el ciclo 1. Se observaron las plagioclasas de los clastos oxidadas, con tonos naranja y poros rellenos de óxidos.	
	Dimensiones: -0,22% de diámetro +0,20% de longitud		
Medio (día 27 al día 68)	Masa: -0,67%.	Se formaron grietas a lo largo de la muestra, debido a la disolución de los carbonatos que las rellenan. Se observó un leve desgrane en la superficie al contacto con los dedos, que tuvo como residuo granos finos.	
	Dimensiones: +0,18% de diámetro 0,0% de longitud		
Final (día 69 al día 85)	Masa: +0,33%	Las grietas se profundizaron. Se observaron depósitos de un mineral blanco de grano fino, en las vesículas de los clastos y la superficie de la muestra, y sobre las paredes del recipiente. En general, cambios en las dimensiones de menos del 0,1 mm	
	Dimensiones: +0,13% de diámetro +0,25% de longitud		
Total	Masa: - 8,26%	Dimensiones: +0,08% de diámetro -0,05% de longitud	Volumen -5,75 %

En la etapa inicial, la muestra tuvo una pérdida de masa de 7,93%, y posterior a este ciclo, los cambios que se presentaron fueron de menos del 1%, lo que indica que esta pérdida inicial de masa, posiblemente se debió a la caída de material externo adherido a la roca, ya que no tiene ningún cambio visible que justifique ese valor.

En la etapa intermedia, las grietas se profundizaron, estimuladas por los cambios térmicos y la disolución de los carbonatos que las rellenan. En la etapa final, se observó un mineral blanco de grano fino dentro de las vesículas, posiblemente yeso. En total perdió 8,26% de masa, y 5,75% de volumen, sin embargo no se observó

desgaste aparente, por lo que se atribuye esta disminución en sus propiedades a la disolución de carbonatos expuestos en superficie dentro de los clastos y las vetillas. Sus dimensiones no presentaron cambios significativos.

El valor de pH, como se observa en la Figura 46, presentó una variación en la primera inmersión hasta pH 4,5, reflejando la reacción inicial con los carbonatos de la superficie, y después se mantuvo estable a lo largo de todo el periodo.

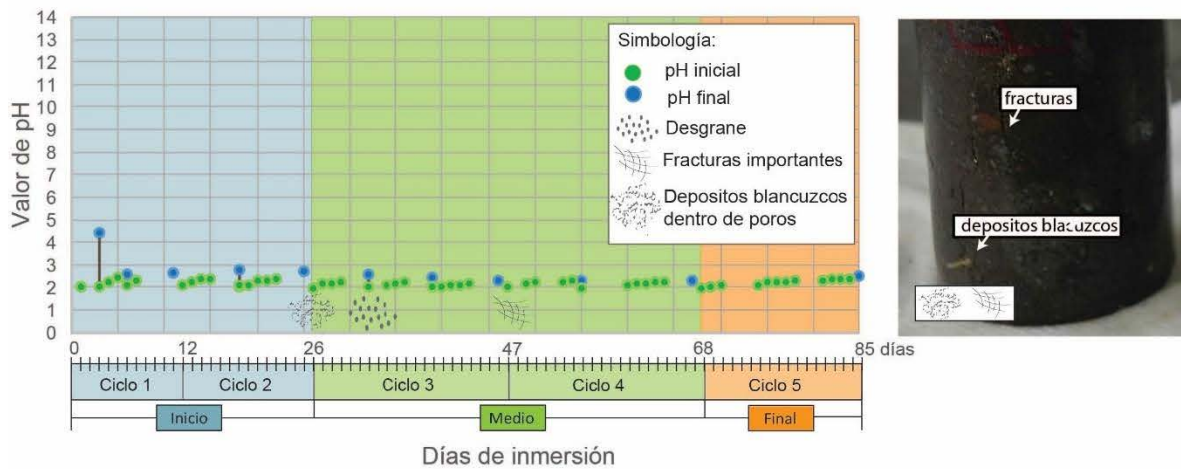


Figura 46. Cambios en el valor de pH 2 de la disolución en contacto con las muestras de brecha volcánica en el ensayo de Ciclo Alternado.

Mineralógicamente, la muestra se conforma principalmente por clastos andesíticos, estos no presentaron ninguna alteración de su composición original y se observan los carbonatos alterando las plagioclasas y en la matriz arcillosa (Cuadro 29).

Cuadro 29. Descripción microscópica de la muestra de brecha volcánica expuesta a disolución con pH 2.

Código	Valor de pH	Descripción Microscópica
B3	pH 2	Clastos andesíticos (68%) con fenocristales de: plagioclasas fracturadas, con textura cribosa y glomeroporfírica. Augita y augita titanífera. Cristales fantasma, rellenos completamente de carbonatos. Opacos. Cantidad traza de clorita. Matriz (32%) con arcilla y microlitos de plagioclasas y augitas. Ver Figura 47

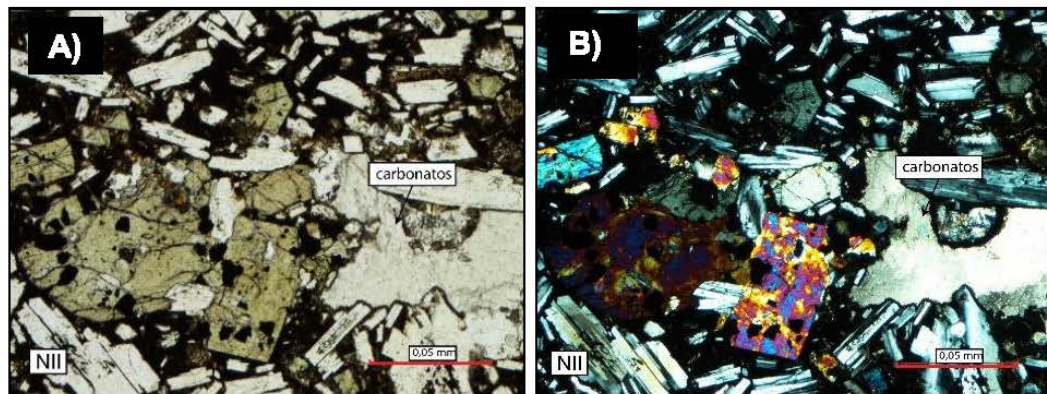


Figura 47. Fotografías de sección delgada de muestras de brecha en el Ciclo Alternado inmerso en disolución con pH 2. A) Nícoles paralelos. B) Nícoles cruzados.

Andesita – Ensayo Ciclo Alternado pH 2

En el Cuadro 30, se presentan las medidas y observaciones de las características de las muestras de roca andesítica, que fueron sumergidas en disolución ácida con pH 2.

Cuadro 30. Medidas y observaciones de la muestra de andesita en el ensayo de Ciclo Alternado con una disolución ácida de pH 2.

Andesita			
Periodo	Mediciones	Observaciones	
Inicial (día 1 al día 26)	Masa: -0,12%	No se observó ningún cambio en sus características.	
	Dimensiones: -0,14% de diámetro +0,90% de longitud		
Medio (día 27 al día 68)	Masa: 0,0%	No se observa ningún cambio en sus características.	
	Dimensiones: +0,11% de diámetro -0,97% de longitud		
Final (día 69 al día 85)	Masa: 0,0%	No se observa ningún cambios en sus características	
	Dimensiones: +0,13% de diámetro -0,25% de longitud		
Total	Masa: -0,12%	Dimensiones: -0,23% de diámetro -0,03% de longitud	Volumen: +4,19%

En la etapa inicial se observó una reducción de 0,12 % de su masa, sin embargo, en ninguna de las demás etapas se observaron cambios en las características de las muestras. Por lo tanto, se considera un cambio de masa nulo, sin embargo, sí hubo un aumento del volumen de 4,19 %. Posiblemente por el ensanchamiento entre partículas por los cambios térmicos.

Como se observa en la Figura 48, el valor de pH se mantuvo completamente estable, que evidencia la poca o nula reacción de la roca en la disolución ácida.

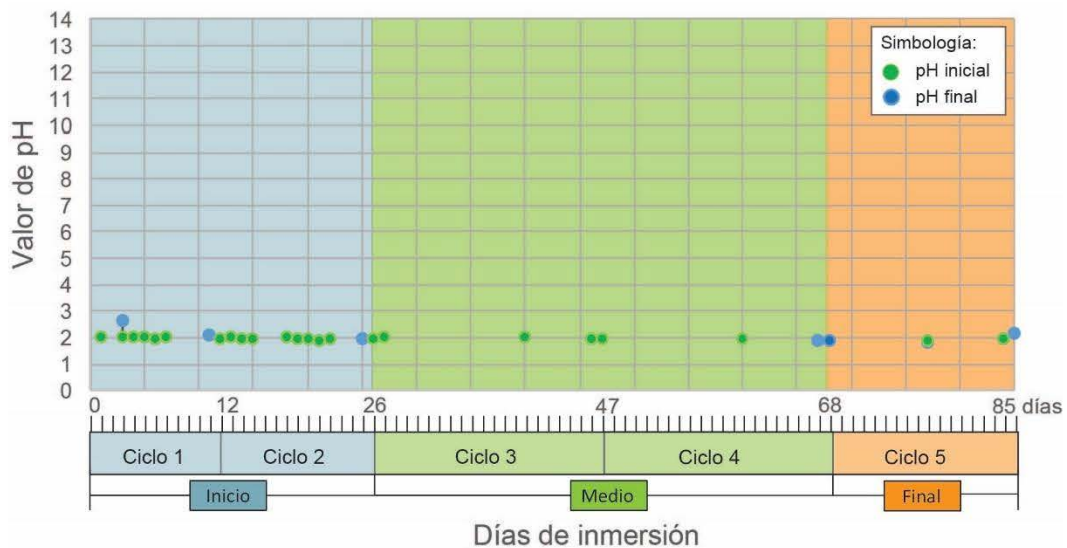
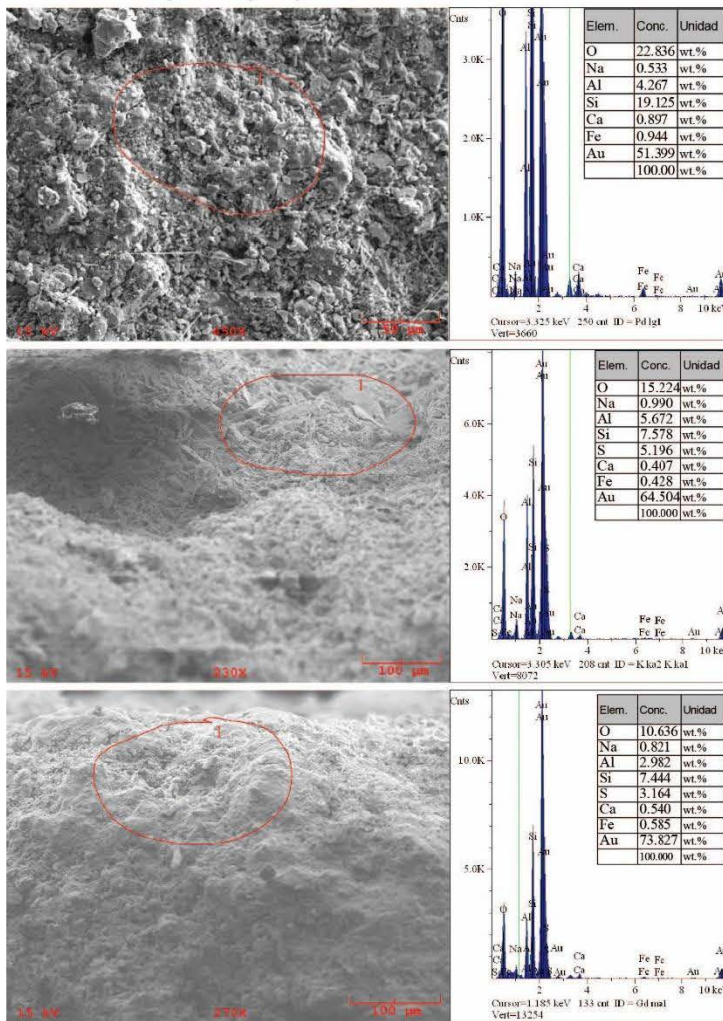


Figura 48. Cambios en el valor de pH 2 de la disolución en contacto con las muestras de andesita en el ensayo de Ciclo Alternado.

Microscópicamente, las muestras no presentaron ningún tipo de alteración. De acuerdo al análisis espectral se obtiene alta concentración en sílice y aluminio, y en menor proporción azufre, el cual no se observó en su estado inicial (Figura 49).

A) Microfotografías y espectro elemental



B) Fotografías secciones delgadas

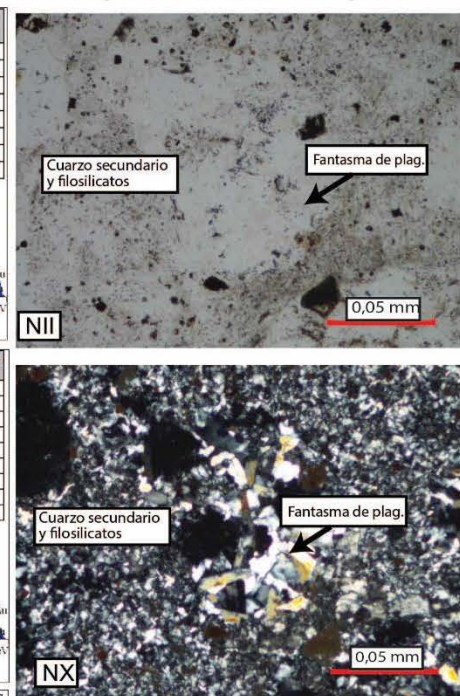


Figura 49. A) Microfotografías y espectro elemental en tres sitios marcados con círculos rojos, de la muestra de andesita. B) Fotografías de las secciones delgadas.

Cinética de la reacción

En la Figura 50, se observan los diferentes comportamientos de la acidez de la disolución con pH 2 en cada tipo de muestra a lo largo del periodo.

El concreto lanzado, al ser el material con mayor concentración de carbonatos en su composición, reacciona significativamente con el ácido y a lo largo del periodo del ensayo hay importantes variaciones en el pH. Al disminuir la concentración de estos componentes entonces la acidez tiende a estabilizarse.

La brecha volcánica está compuesta por una menor cantidad de carbonatos que reaccionan levemente con la disolución, por esta razón el valor de pH se comporta relativamente estable. Esto indica que el potencial de reacción depende de la concentración de componentes calcáreos que contenga el material. Es por esto que la roca andesítica utilizada en este ensayo, no presentó variaciones en su pH en todo el periodo del ensayo.

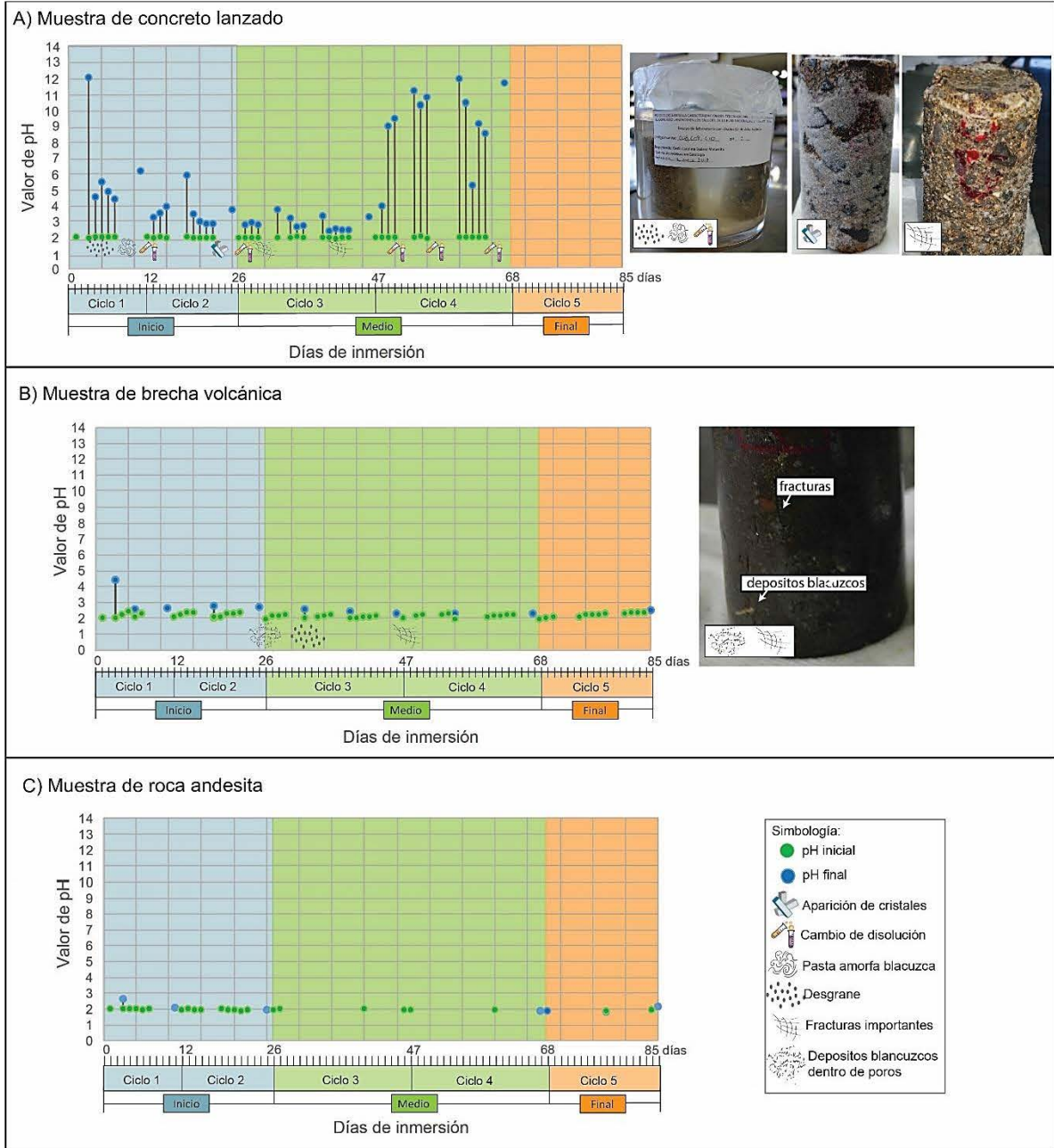


Figura 50. Cambios en el valor de pH de la disolución en contacto con las muestras en el ensayo de Ciclo Alternado. A) Muestra de concreto lanzado. B) Muestra de brecha volcánica. C) Muestra de andesita.

4.4.2 Muestras sumergidas en disolución con valor de pH 4

En la Figura 51, se presentan los resultados de los cambios en la masa y en las características desde el estado inicial hasta el estado final de los tres tipos de muestra, y su comportamiento en cada ciclo intermedio. Cada gráfico está dividido en los cinco ciclos, y cada ciclo presenta el valor del cambio de la masa.

Muestras en disolución ácida con pH 4

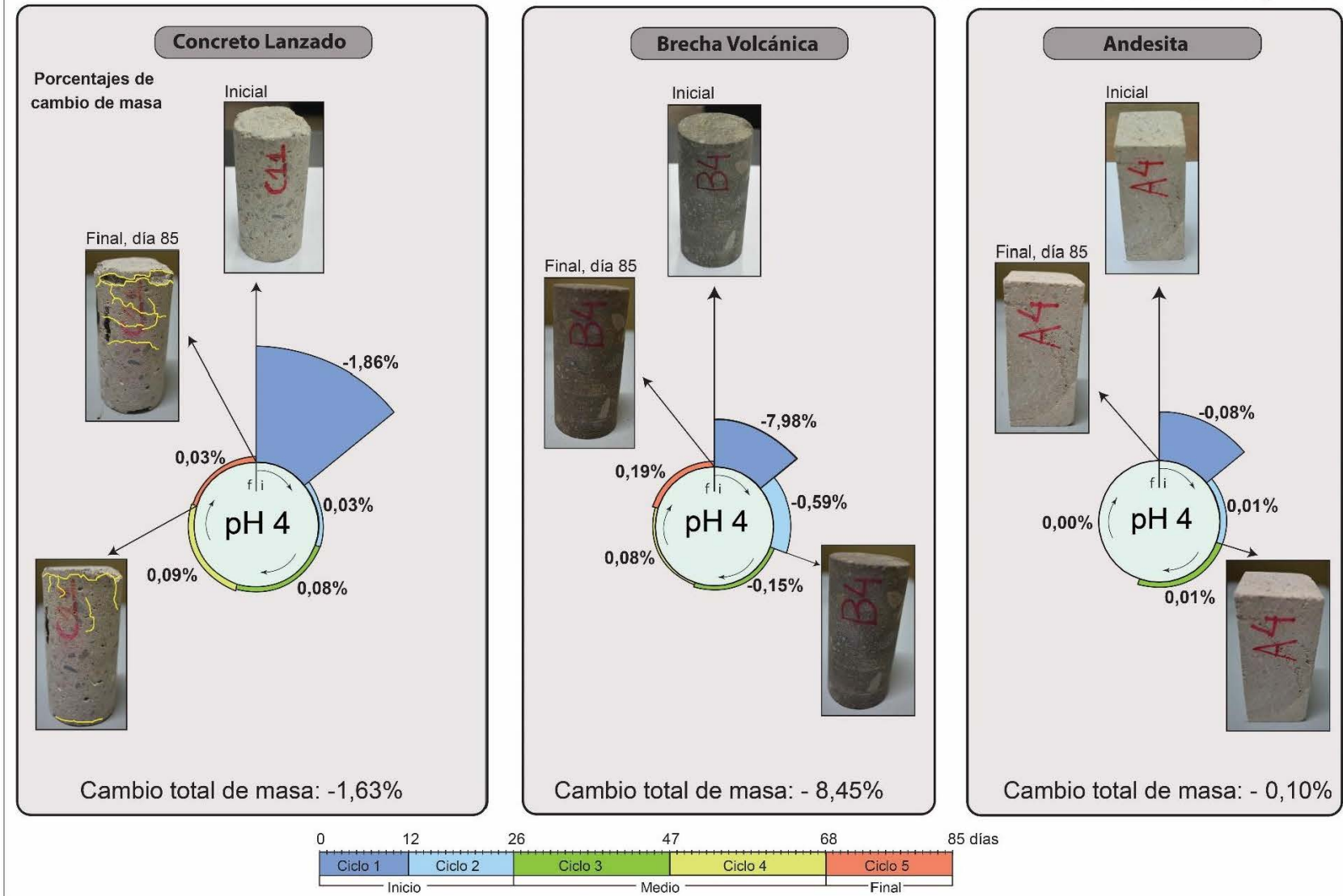


Figura 51. Información sobre el cambio de masa para los tres tipos de muestra inmersas en disolución ácida con pH 4, en el ensayo Ciclo Alternado.

Concreto Lanzado – Ensayo de Ciclo Alternado pH 4

En el Cuadro 31, se analizan los resultados observados de las medidas y observaciones de las características de las muestras de concreto lanzado, sumergidas en disolución ácida con pH 4.

Cuadro 31. Medidas y observaciones del ensayo de Ciclo Alternado con una disolución ácida de pH 4.

Concreto Lanzado			
Periodo	Mediciones	Observaciones	
Inicial (día 1 al día 26)	Masa: -1,83%	Los agregados finos estaban oxidados con colores naranja. La disolución adquirió un olor a podrido.	
	Dimensiones: -0,07% de diámetro -0,13% de longitud		
Medio (día 27 al día 68)	Masa: +0,17%	Se observaron grietas en el diámetro superior. Los agregados gruesos presentaron depósitos blancuzcos en el centro del grano. Después del secado, había grietas paralelas a la circunferencia superior que rodeaban los agregados gruesos. Había caída de agregados gruesos.	
	Dimensiones: +0,76% de diámetro +0,85% de longitud		
Final (día 69 al día 85)	Masa: +0,03%	Las grietas se abrieron aún más, principalmente en la circunferencia superior.	
	Dimensiones: +0,69% de diámetro +0,86% de longitud		
Total	Masa: -1,63%	Dimensiones: +1,38% de diámetro +1,58% de longitud	Volumen: -1,89%

En la etapa inicial, las muestras presentaron una pérdida de masa de 1,86 %, este fue mayor en el ciclo 1, que en el ciclo 2, esto posiblemente por el primer contacto de la muestra sana con la disolución. En la etapa media, se observó el desprendimiento de los agregados gruesos debido a las grietas provocadas por los

cambios térmicos que producen contracción y dilatación en la muestra. Las grietas se forman en zonas débiles alrededor de los agregados gruesos, en la circunferencia superior, lo que ocasionan que estos caigan. Esto pudo haber ocasionado el leve aumento de las dimensiones. La pérdida de masa reflejó una disminución de volumen de 1,89%. El aumento de la longitud se debe a la expansión de la muestra debido a sus grietas en la circunferencia superior e inferior.

Debido a la alta concentración de carbonatos, estos reaccionan fácilmente con el ácido, sin embargo al ser de baja acidez entonces se requiere de mayor tiempo de exposición para el desgaste de la matriz (Figura 52).

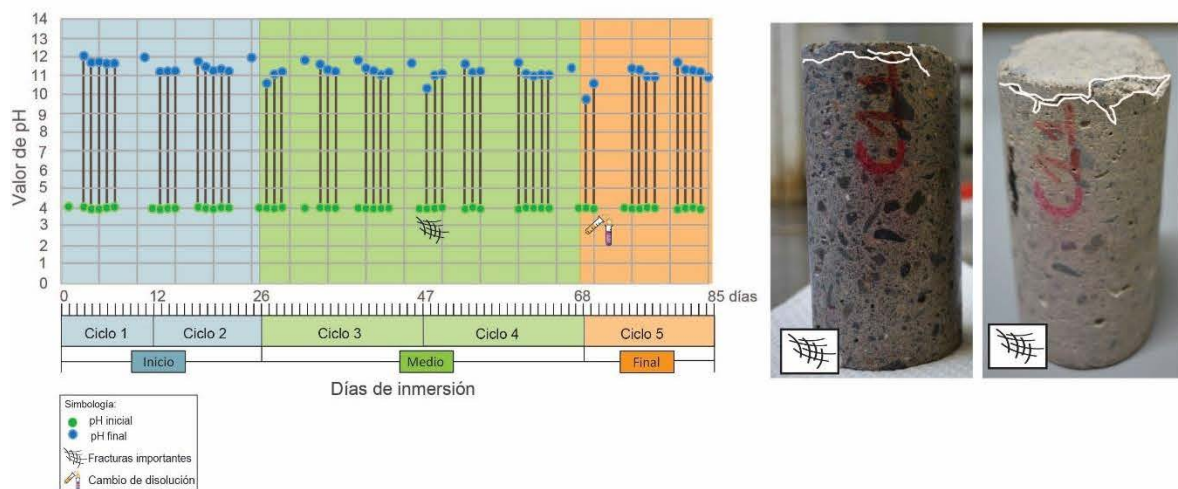


Figura 52. Cambios en el valor de pH 4 de la disolución en contacto con las muestras de concreto lanzado en el ensayo de Ciclo Alternado.

Mineralógicamente, los agregados andesíticos y silíceos presentan impregnaciones de óxido y algunos bordes de reacción, además se observó la caída de gran cantidad de material (Cuadro 32).

Cuadro 32. Descripción mineralógica de la muestra de concreto lanzado, inmersa en disolución pH 4.

Código	Valor de pH	Descripción Microscópica
C11	pH 4	Agregados andesíticos y silíceos, con impregnaciones de óxido y fracturas. Algunos presentan bordes de reacción delgados. Gran cantidad de material caído. Ver Figura 53

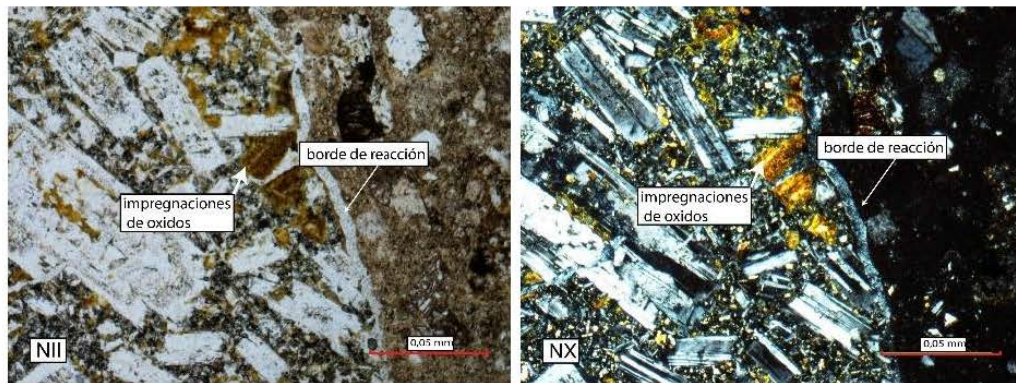


Figura 53. Fotografías de sección delgada de muestra de concreto lanzado en el Ciclo Alternado inmerso en disolución con pH 4. A) Nícoles paralelos. B) Nícoles cruzados.

Brecha volcánica – Ensayo de Ciclo Alternado pH 4

En el Cuadro 33, se muestran las medidas y observaciones de las características de las muestras de brecha volcánica que fueron sumergidas en disolución ácida con pH 4.

Cuadro 33. Medidas y observaciones de la muestra de brecha volcánica en el ensayo de Ciclo Alternado con una disolución ácida de pH 4.

Brecha Volcánica			
Periodo	Mediciones	Observaciones	
Inicial (día 1 al día 26)	Masa: -8,57%	Se observaron clastos milimétricos oxidados, de color naranja. Estos óxidos también rellenaban las vesículas.	
	Dimensiones: -0,50% de diámetro +0,31% de longitud		
Medio (día 27 al día 68)	Masa: -0,07%	El centro de los clastos gruesos se presentaba un pequeño depósitos de material blancuzco.	
	Dimensiones: +0,30% de diámetro -0,39% de longitud		
Final (día 69 al día 85)	Masa: +0,19%	No se observan cambios	
	Dimensiones: -0,40% de diámetro +0,70% de longitud		
Total	Masa: -8,45%	Dimensiones: -0,60% de diámetro -0,01% de longitud	Volumen: -6,69%

En la etapa inicial, la mayor pérdida de masa ocurre en el ciclo 1, esto se debe a la caída de material externo adherido a la muestra, en la primera inmersión, ya que en el ciclo 2, solo disminuye un 0,5 %. En la etapa media, los carbonatos de los clastos reaccionan con la disolución y presenta depósitos blancuzcos de posiblemente yeso. En la etapa final, no se observaron cambios y el valor de pH se estabiliza. Se observa una disminución en su volumen de 6,69 %, debido a la pérdida de masa que presenta y la disolución de carbonatos en la superficie. Los cambios en las dimensiones se consideran nulos.

En la disolución, se observa leves cambios en el pH, debido a la reacción de la poca concentración de carbonatos que presenta la roca con la disolución ácida (Figura 54).

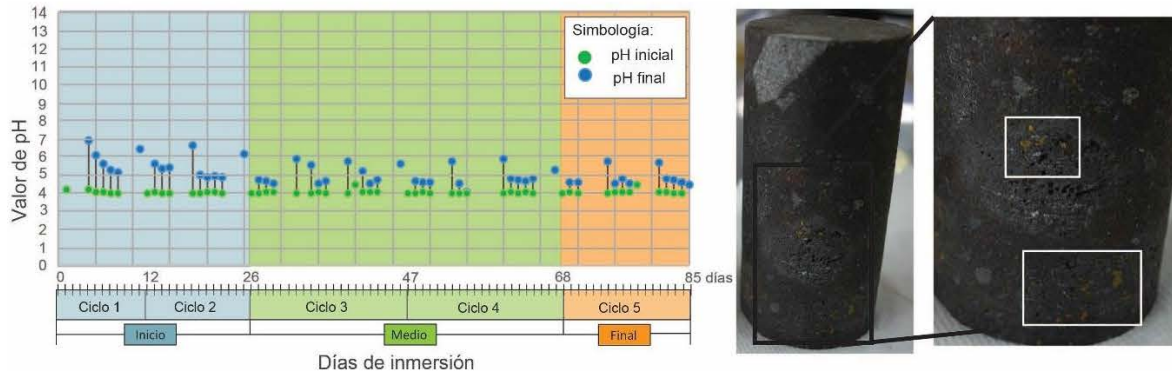


Figura 54. Cambios en el valor de pH 4 de la disolución en contacto con las muestras de brecha volcánica en el ensayo de Ciclo Alternado.

Mineralógicamente, la muestra presentó clastos andesíticos y vetillas rellenas de carbonatos. Matriz arcillosa con microlitos de plagioclasas y augita. Por lo tanto, no se observó cambios por el contacto con la disolución. (Cuadro 34).

Cuadro 34. Descripción mineralógica de la muestra de brecha volcánica, inmersa en disolución pH 4.

Código	Valor de pH	Descripción Microscópica
B4	pH 4	Clastos (52%) andesíticos. Fenocristales, plagioclasas (25%) cristales con textura cribosa, glomeroporfírica, fracturados y rellenos de carbonatos. Augita (20%) cristales iddingsitizados y fracturados. Opacos (7%) cristales xenomórficos. Matriz (48%) arcillas y microlitos de plagioclasas y augita. Vetilla rellena de carbonatos. Ver Figura 55

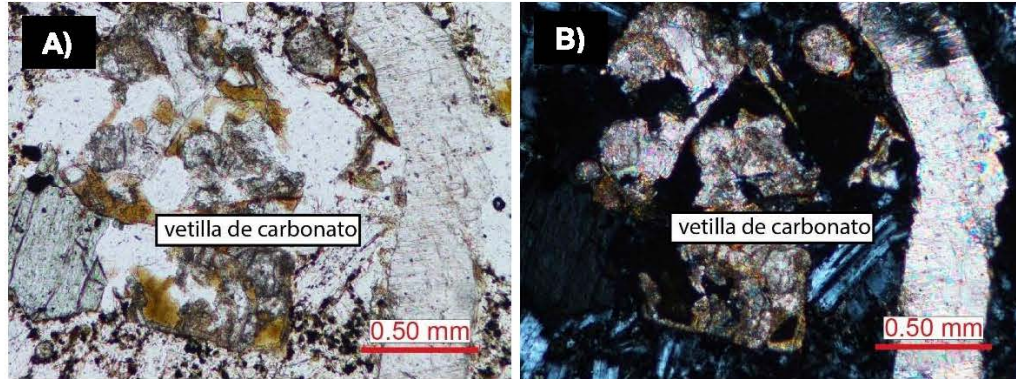


Figura 55. Fotografías de sección delgada de la muestra de brecha volcánica en el Ciclo Alternado inmerso en disolución con pH 4. A) Nicoles paralelos. B) Nicoles cruzados.

Andesita – Ensayo de Ciclo Alternado pH 4

En el Cuadro 35, se presentan las medidas y observaciones de las características de las muestras de roca andesítica que fueron sumergidas en disolución ácida con pH 4.

Cuadro 35. Medidas y observaciones de la andesita en el ensayo de Ciclo Alternado con una disolución ácida de pH 4.

Andesita			
Periodo	Mediciones	Observaciones	
Inicial (día 1 al día 26)	Masa: -0,07%	No se observó ningún cambio en sus características.	
	Dimensiones: +0,32% de diámetro -0,23% de longitud		
Medio (día 27 al día 68)	Masa: +0,01%	No se observa ningún cambio en sus características.	
	Dimensiones: +0,45% de diámetro -0,25% de longitud		
Final (día 69 al día 85)	Masa: 0,0%	No se observa ningún cambios en sus características	
	Dimensiones: -0,68% de diámetro +0,26% de longitud		
Total	Masa: -0,06%	Dimensiones: +0,10% de diámetro -0,21% de longitud	Volumen: +2,75%

Debido a la mineralogía de la roca y la ausencia de componentes calcáreos, esta muestra no reacciona con la disolución ácida (Figura 56), por lo tanto los cambios en sus propiedades se consideran nulos. El cambio de volumen también se considera despreciable al considerar las características de la muestra.

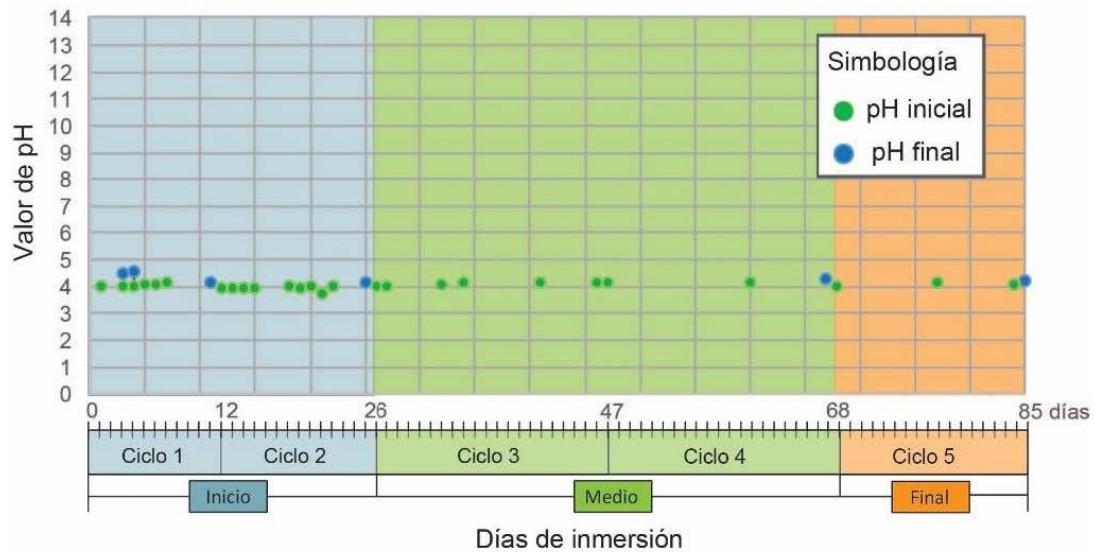


Figura 56. Cambios en el valor de pH 4 de la disolución en contacto con las muestras de brecha volcánica en el ensayo de Ciclo Alternado.

Cinética de la reacción

En la Figura 57, se observan los cambios del valor de pH a lo largo del periodo del ensayo, para cada tipo de muestra. La disolución en la que está inmersa el concreto lanzado, presenta los mayores cambios debido a que contiene mayor concentración de carbonatos que reaccionen con el ácido. La brecha volcánica al tener menos cantidad de este componente tiene una reacción menor con el ácido y hasta el final del ciclo se observó un leve desgrane de la muestra, lo que indica que para es necesario mayor tiempo de exposición para observar el efecto en ella. La muestra de roca andesita no presentó ningún tipo de reacción con la disolución.

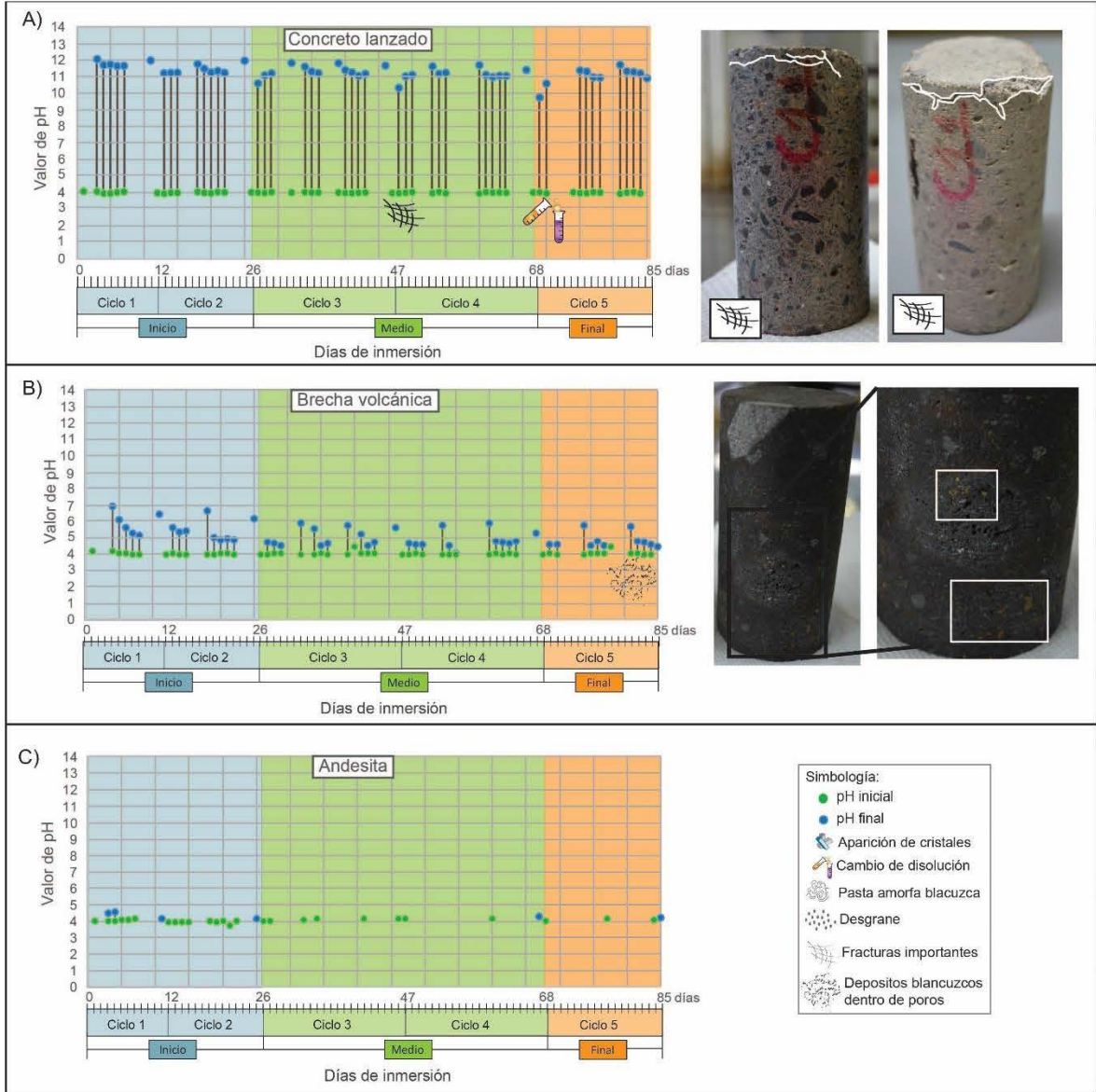


Figura 57. Cambios en el valor de pH de la disolución en contacto con las muestras en el ensayo de Ciclo Alternado. A) Muestra de concreto lanzado. B) Muestra de brecha volcánica. C) Muestra de andesita.

4.4.3 Muestras sumergidas en disolución con valor de pH 5,5

En la Figura 58, se muestran los resultados de los cambios en la masa y en las características cada ciclo intermedio de las muestras inmersas en disolución con valor de pH 5,5. Cada gráfico está dividido en los cinco ciclos, y cada ciclo presenta el valor del cambio de la masa.

Muestras en disolución ácida con pH 5,5

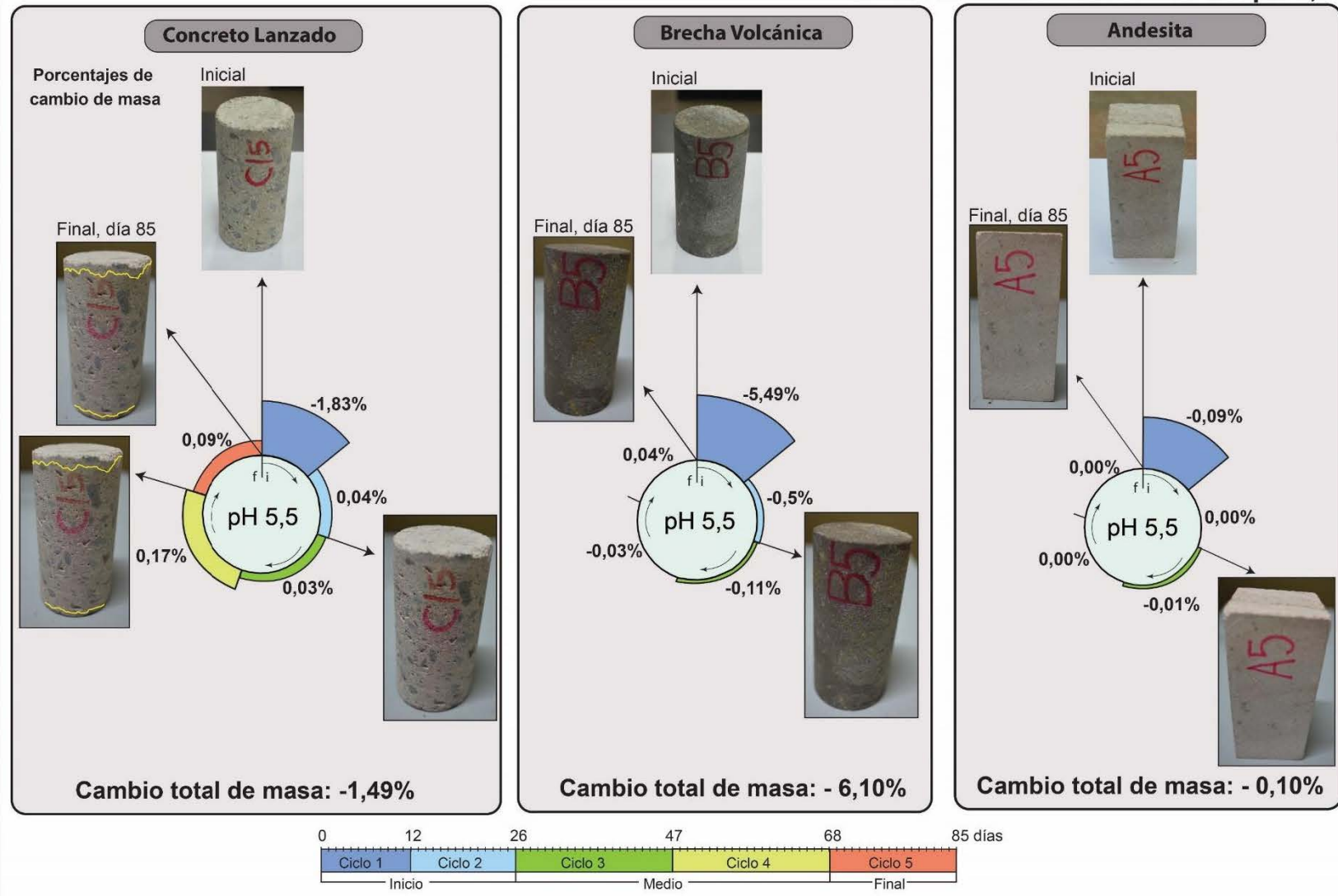


Figura 58. Información sobre el cambio de masa para los tres tipos de muestra inmersas en disolución ácida con pH 5,5, en el ensayo Ciclo Alternado.

Concreto Lanzado - Ensayo de Ciclo Alternado pH 5,5

En el Cuadro 36 se presentan las medidas y observaciones de las características de las muestras de concreto lanzado que fueron sumergidas en disolución ácida con pH 5,5.

Cuadro 36. Medidas y observaciones del concreto lanzado en el Ciclo Alternado con una disolución ácida de pH 5,5.

Concreto Lanzado			
Periodo	Mediciones	Observaciones	
Inicial (día 1 al día 26)	Masa: -1,79%	Los agregados finos estaban oxidados con color naranja. La disolución adquirió un olor a podrido.	
	Dimensiones: -0,18% de diámetro -0,07% de longitud		
Medio (día 27 al día 68)	Masa: +0,20%	Se observaron residuos finos de un mineral blanco en las paredes del recipiente. Las muestras presentaban grietas pequeñas en la circunferencia superior.	
	Dimensiones: +0,56% de diámetro +0,38% de longitud		
Final (día 69 al día 85)	Masa: +0,09%	Las grietas están más abiertas y se dispersan por la muestra, alrededor de los agregados gruesos. Caída de agregados gruesos. No se observa desgaste en la matriz	
	Dimensiones: +0,55% de diámetro +0,54% de longitud		
Total	Masa: -1,49%	Dimensiones: +0,93% de diámetro +0,85% de longitud	Volumen: -1,89%

En la etapa inicial, se observó principalmente la oxidación de agregados finos y una pérdida de 1,83 % de masa. En la etapa media, se observaron cristales diminutos e incoloros adheridos al recipiente de vidrio, siendo posiblemente yeso debido a la reacción del ácido sulfúrico con los carbonatos. También se formaron grietas

alrededor de agregados gruesos provocadas por los cambios térmicos a los son sometidas las muestras, que genera un efecto de dilatación y contracción del concreto. Esto produce en su etapa final, la caída de agregados gruesos debido a que las grietas de alrededor de estos debilitan su sostenimiento. En los últimos dos ciclos se observa un aumento de menos de 1% en su masa y cambios no significativos en sus dimensiones. El volumen total tuvo una disminución de 1,89%, el cual se considera un reflejo de la leve pérdida de masa.

La alta concentración de carbonatos en las muestras de concreto lanzado, reaccionan fácilmente con la disolución, pero al tener esta baja acidez toma mayor tiempo que generar algún desgaste (Figura 59). Sin embargo, en el medio del ciclo 3, se observó la adherencia de cristales diminutos e incoloros en el recipiente, producto de la reacción que genera sulfatos de calcio.

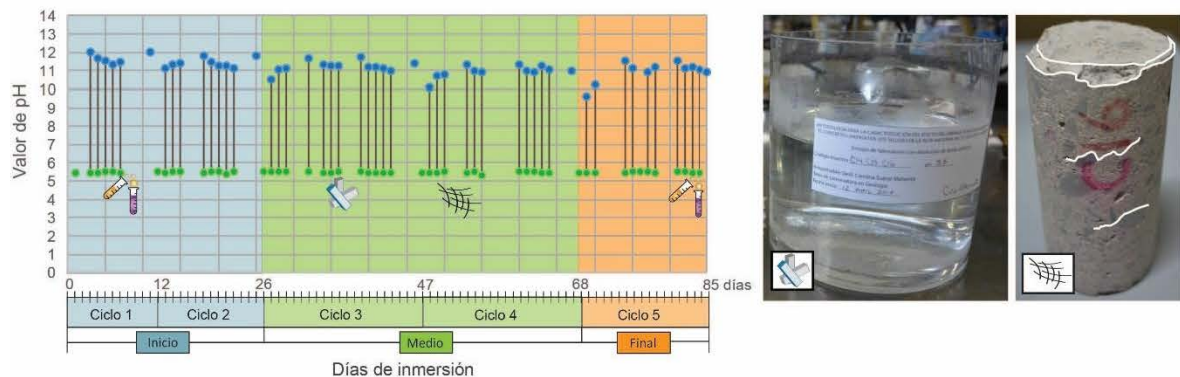


Figura 59. Cambios en el valor de pH 5,5 de la disolución en contacto con las muestras de concreto lanzado en el ensayo de Ciclo Alternado.

Mineralógicamente como se observa en el Cuadro 37 la muestra no presentó alteraciones en su composición original, y no se observa desgaste en su matriz.

Cuadro 37. Descripción mineralógica de la muestra de concreto lanzado, inmersa en disolución pH 5,5.

Código	Valor de pH	Descripción Microscópica
C14	pH 5,5	Los agregados andesíticos y silíceos, no presentan ningún tipo de alteración en sus bordes. Matriz sana. Ver Figura 60.

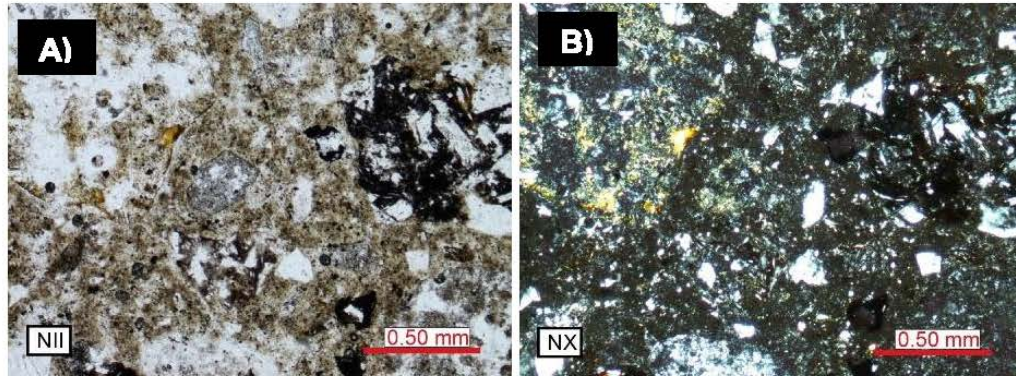


Figura 60. Fotografías de sección delgada de muestras de concreto lanzado en el Ciclo Alternado inmerso en disolución con pH 5,5. A) Nícoles paralelos. B) Nícoles cruzados.

Brecha volcánica - Ensayo de Ciclo Alternado pH 5,5

En el Cuadro 38 se presentan las medidas y observaciones de las características de las muestras de brecha volcánica que fueron sumergidas en disolución ácida con pH 5,5.

Cuadro 38. Medidas y observaciones en la brecha volcánica del ensayo de Ciclo Alternado con una disolución ácida de pH 5,5.

Brecha volcánica			
Periodo	Mediciones	Observaciones	
Inicial (día 1 al día 26)	Masa: -5,99%	Se observan minerales de los clastos, oxidados con tonos naranja. También óxidos rellenoando vesículas milimétricas.	
	Dimensiones: -0,06% de diámetro +0,33% de longitud		
Medio (día 27 al día 68)	Masa: -0,14%	No se observan cambios en la muestra. Hay residuos de un mineral blanco en la base del recipiente.	
	Dimensiones: -0,10% de diámetro -0,42% de longitud		
Final (día 69 al día 85)	Masa: -0,04%	No se observan cambios	
	Dimensiones: +0,06% de diámetro +0,07% de longitud		
Total	Masa: -6,10%	Dimensiones: -0,10% de diámetro -0,02% de longitud	Volumen: -1,89%

Se observa en la etapa inicial una pérdida de 5,99 % de masa, donde la mayor pérdida de masa ocurre en el ciclo 1. En la etapa media, resultó una pérdida de masa de 0,12 % y se observaron residuos de yeso en el recipiente, lo que indica que sí existe una reacción del ácido con la muestra. Al presentarse una disminución de masa tan pequeña en esta etapa, y comparada con la etapa inicial, se considera que la disminución de masa debe a la caída de material externo adherido previamente, en la primera inmersión. La pérdida de masa de la etapa final es despreciable, al igual que los cambios de dimensiones que presentó la muestra. El volumen tuvo una disminución de 1,89 % debido a la pérdida de masa de la muestra.

Las muestra de brecha volcánica presenta menor concentración de carbonatos en superficie y al estar expuesta a una menor acidez, es necesario mayor tiempo de exposicion para observar cambios importantes, ademas de la oxidación del componente calcáreo de los clastos expuestos en la superficie (Figura 61).

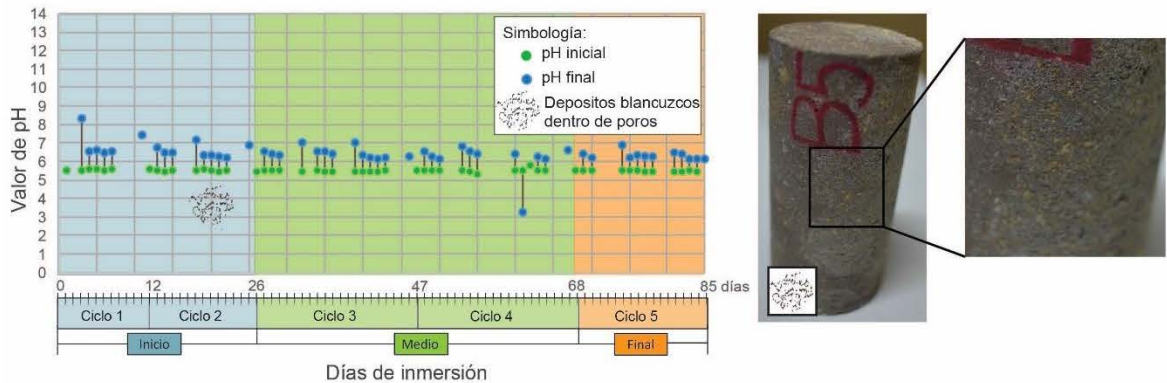


Figura 61. Cambios en el valor de pH 5,5 de la disolución en contacto con las muestras de brecha volcánica en el ensayo de Ciclo Alternado.

Microscópicamente, de acuerdo al Cuadro 39, se observan clastos alterados a carbonatos y fracturas sin relleno, esto indica que no hubo alteración provocado por el contacto con la disolución ácida.

Cuadro 39. Descripción mineralógica de la muestra de brecha volcánica, inmersa en disolución pH 5,5

Código	Descripción Microscópica
B5	Clastos (80%) andesíticos. Fenocristales, plagioclasas (40%) con textura cribosa y opacitizados, fracturas rellenas de carbonatos. Augita (15%) con halos de opacita. Opacos (5%). Carbonatos (20%) cristales xenomórficos rellena espacios vacíos. Cristales fantasma de olivinos iddingsitizados, otros con alteración a carbonatos. Matriz (20%) textura hialopilítica con microlitos de plagioclasas. Caída de material por la preparación. Ver Figura 62

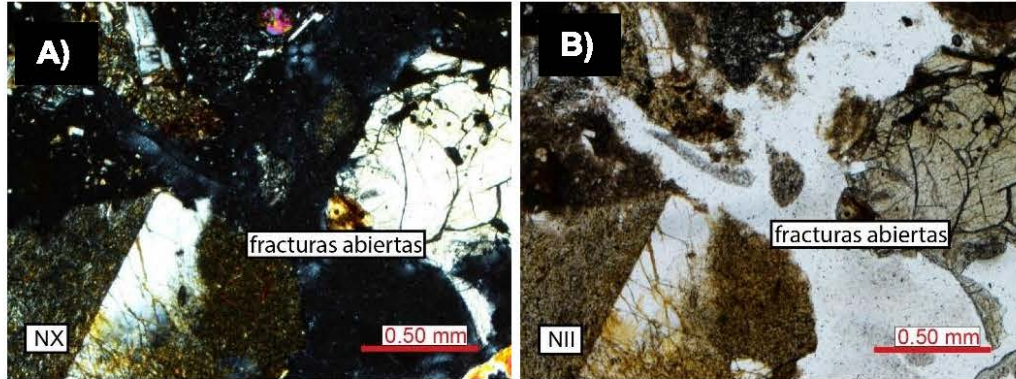


Figura 62. Fotografías de sección delgada de muestras de brecha volcánica en el Ciclo Alternado inmerso en disolución con pH 5,5. A) Nícoles paralelos. B) Nícoles cruzados.

Andesita - Ensayo de Ciclo Alternado pH 5,5

En el Cuadro 40 se presentan las observaciones de las características de las muestras de roca andesítica.

Cuadro 40. Medidas y observaciones de la andesita en el ensayo de Ciclo Alternado con una disolución ácida de pH 5,5.

Andesita			
Periodo	Mediciones	Observaciones	
Inicial (día 1 al día 26)	Masa: -0,09%	No se observan alteraciones.	
	Dimensiones: -0,23% de diámetro -0,37% de longitud		
Medio (día 27 al día 68)	Masa: 0,0%	No se observan alteraciones	
	Dimensiones: -0,05% de diámetro +0,05% de longitud		
Final (día 69 al día 85)	Masa: 0,0%	No se observan alteraciones	
	Dimensiones: -0,30% de diámetro -0,11% de longitud		
Total	Masa: -0,09%	Dimensiones: -0,58% de diámetro -0,44% de longitud	Volumen: -1,91%

De acuerdo con los resultados para la muestra de andesita inmersa en disolución con pH 5,5, los cambios se consideran nulos, debido a que los valores son mínimos y por esta razón el valor de pH se mantiene estable en todo el periodo del ensayo (Figura 63). Esto ocurre debido a la composición mineralógica de la muestra, carece de componentes calcáreos que se reaccionen con la disolución ácida.

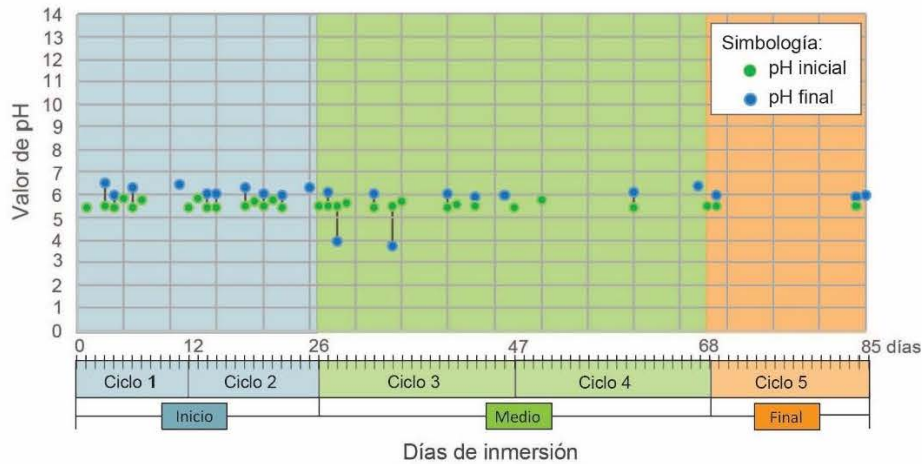


Figura 63. Cambios en el valor de pH 5,5 de la disolución en contacto con las muestras de andesita en el ensayo de Ciclo Alternado.

Cinética de la reacción

En la Figura 64, se observan los cambios de valor de pH durante el periodo del ensayo. En la disolución que contiene las muestras de concreto lanzado, suceden los mayores cambios en la acidez, debido a la alta concentración de carbonatos que presenta la muestra y que reaccionan con el ácido, seguido de las muestras de brecha volcanica, las cuales reaccionan los carbonatos de las vetillas y clastos en superficie. En la roca andesita al carecer de componentes que reaccionen con el ácido, este tiene un comportamiento estable en todo el periodo del experimento.

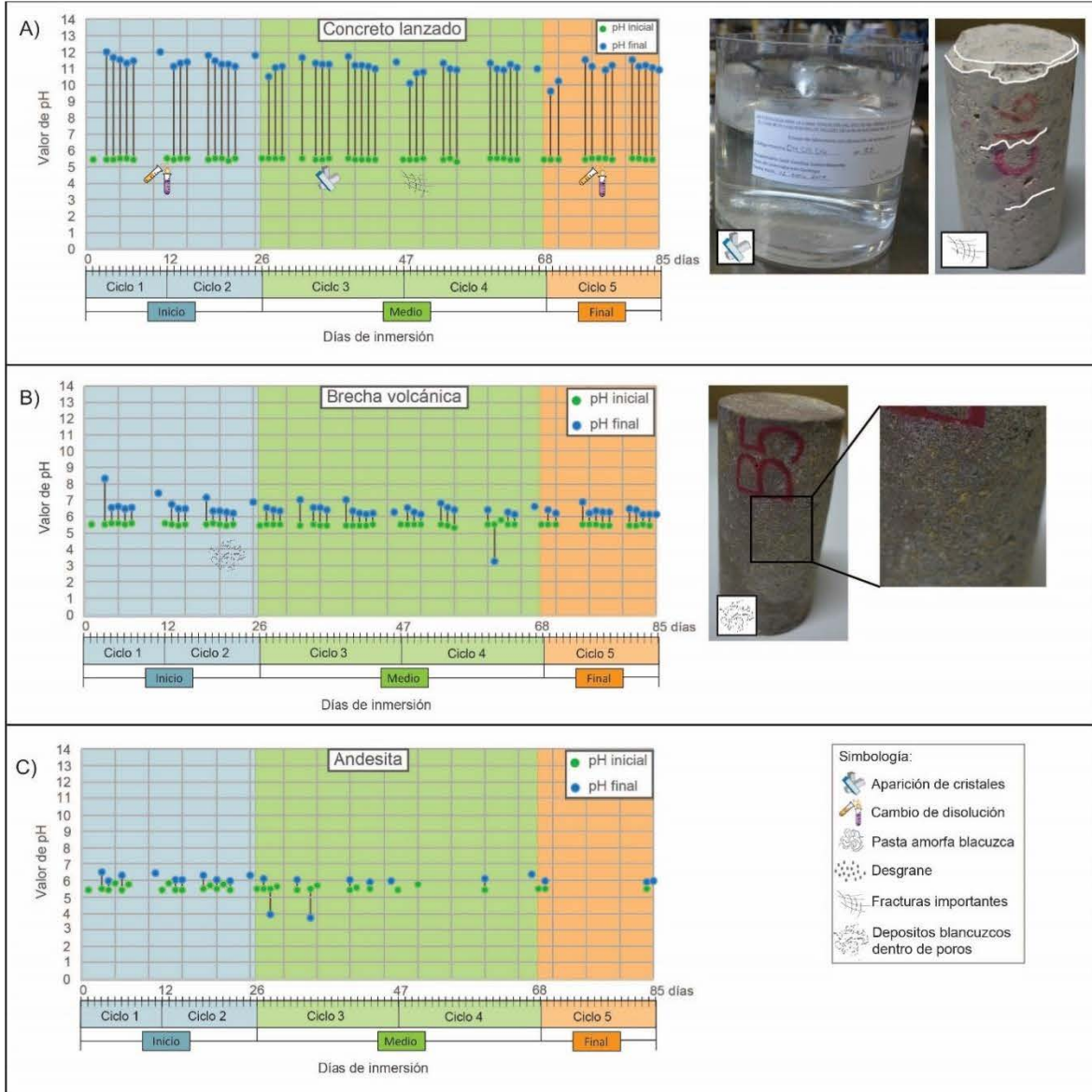


Figura 64. Cambios en el valor de pH de la disolución en contacto con las muestras en el ensayo de Ciclo Alternado. A) Muestra de concreto lanzado. B) Muestra de brecha volcánica. C) Muestra de andesita.

4.5 Ensayo de núcleos expuestos directamente al flujo de DAR.

4.5.1 Ensayo Ducha ácida in situ

En el Cuadro 41, se presentarán los cambios de masa y en las características de las muestras de concreto lanzado y roca que fueron expuestas a las condiciones del DAR naturales en el campo por un periodo de 14 semanas, en los estacionamientos km 38+600 y km 45+000.

Cuadro 41. Cambios de masa y descripciones de las muestras colocadas bajo un flujo constante de DAR *in situ*.

Tipo de muestra	Porcentaje de cambio de masa	Descripción
Km 38+600		
Concreto lanzado	-2,65 %	Presentó un desgaste de matriz significativo y los agregados gruesos al resistirlo quedaron expuestos. Se observó tonalidades rojizas de óxidos en superficie.
Brecha volcánica	-7,62 %	Se observaron depósitos de óxidos en la mitad que estaba en contacto directo con el talud y dentro de las vesículas. En la mitad que se encontraba expuesta se encontraron depósitos amarillentos en algunos clastos. No se observó fracturas.
Km 45+000		
Concreto lanzado	0,31%	Presentó el desarrollo de una pátina roja con óxidos (lado sumergido) y blanco (lado expuesto). La pátina cubre uniformemente la matriz y los agregados de la muestra. Se observaron fracturas en la circunferencia superior e inferior.
Andesita	0,25%	Presentó una tonalidad rojiza debido a los óxidos adheridos en superficie, provenientes del DAR del sitio. Además se observó un depósito blancuzco, de los productos que genera el DAR en condiciones naturales.

De acuerdo con los resultados y la Figura 65, las muestras colocadas en el talud derecho del estacionamiento 38+600, presentaron la mayor pérdida de masa. La

muestra de concreto lanzado tuvo una disminución del 2,65% de masa, y la brecha volcánica del 7,62%. En ambas muestras se desarrolló una pátina de sulfatos y óxidos, sin embargo fue la de concreto lanzado en la que se observó un cambio significativo con el desgaste en su matriz exponiendo los agregados gruesos que no fueron afectados por el DAR. De acuerdo con los resultados de este ensayo y los anteriores; en la muestra de brecha volcánica, al no evidenciarse la caída o desgaste de esta, la pérdida de masa se atribuye a la caída de material externo previamente adherido.

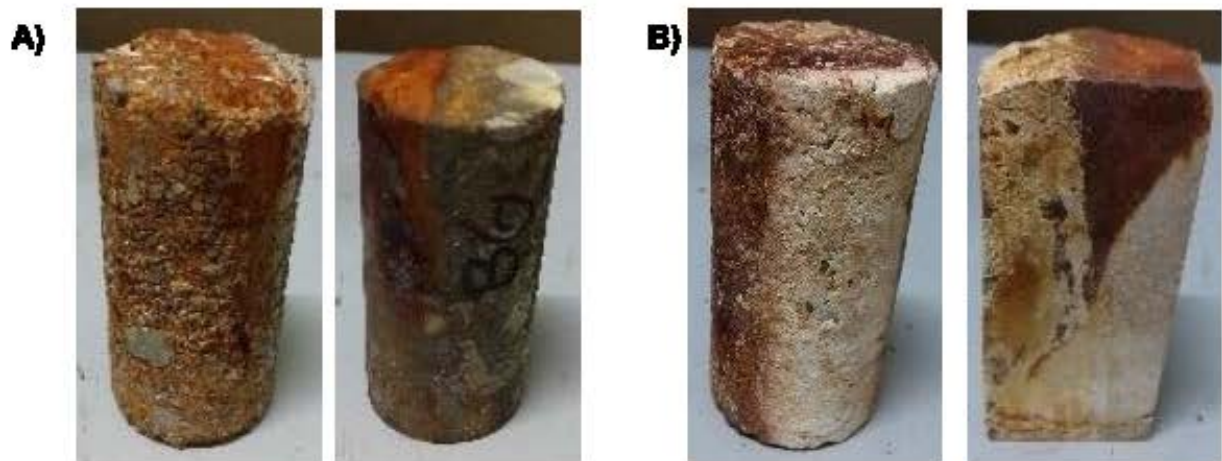


Figura 65. A) La muestra izquierda es concreto lanzado y la derecha es brecha volcánica. B) La muestra izquierda es concreto lanzado y la derecha es andesita.

Las muestras colocadas en el estacionamiento km 45+000, presentaron un leve aumento de menos de 0,5% cada una. Se atribuye a la formación de la pátina gruesa la cual no permitió el desgaste de la matriz. Debido a la caída de sedimentos erosionados del talud sobre las muestras, estas fueron enterradas y no estuvieron expuestas al flujo de DAR en la totalidad del periodo, y se encontraban enterradas en el suelo ácido. En la muestra de concreto lanzado, se observaron fracturas alrededor de la circunferencia superior y en la muestra de roca andesítica, se

observaron tonalidades rojizas y blancuzcas en una capa de óxidos adheridos a la superficie, pero sin ningún desgaste en ella.

4.5.2 Ensayo Ducha ácida en laboratorio

En este ensayo se recreó el impacto de flujo constante de DAR sobre muestras de concreto lanzado en el laboratorio, utilizando los tres valores principales de pH en este estudio, por un periodo de cuatro semanas cada uno.

La disolución ácido de pH 2, ocasionó un desgaste intenso en la matriz de la muestra, con una disminución de 2,80% de masa. Esta presentó coloración anaranjada y provocó la exposición de los agregados gruesos y la caída constante de agregados de grano medio – fino en el recipiente.

La muestra expuesta a la disolución ácida con valor de pH 4, tuvo pérdida de masa del 1,41%, donde se observó un cambio de coloración de la matriz y en los agregados finos por oxidación. En los agregados gruesos no se observó ningún efecto.

La muestra expuesta a la disolución ácida con valor de pH 5,5, presentó una pérdida de porcentaje de masa de 1,17%, donde el desgaste en la matriz fue leve, no hubo cambios de coloración y no se observó una cantidad significativa de residuos en el recipiente.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se ratifica que las muestras presentan un mayor desgaste y pérdida de masa en cuanto se exponen a un valor de pH más ácido. Esto porque la disolución ácida reacciona con mayor intensidad en la matriz del concreto, provocando la disolución de esta, y mientras la abrasión del flujo constante ocasiona la caída de residuos finos y exponen los agregados gruesos, los cuales son más resistentes que el cemento.

El efecto de la disolución ácida también se ve reflejado en la coloración de la matriz de la muestra. Se observa que la muestra expuesta a pH 2 tiene una tonalidad anaranjada por la oxidación de los agregados finos inmersos y expuestos en la matriz. Conforme disminuye el nivel de acidez de la disolución esta coloración no se presenta, es decir, para la muestra expuesta a pH 4, la tonalidad amarillenta es muy leve, y en la muestra expuesta a pH 5,5, no presenta coloración en ella.

En la Figura 66 observan las tres muestras de concreto lanzado con su respectivo valor de pH al que fueron expuestas.

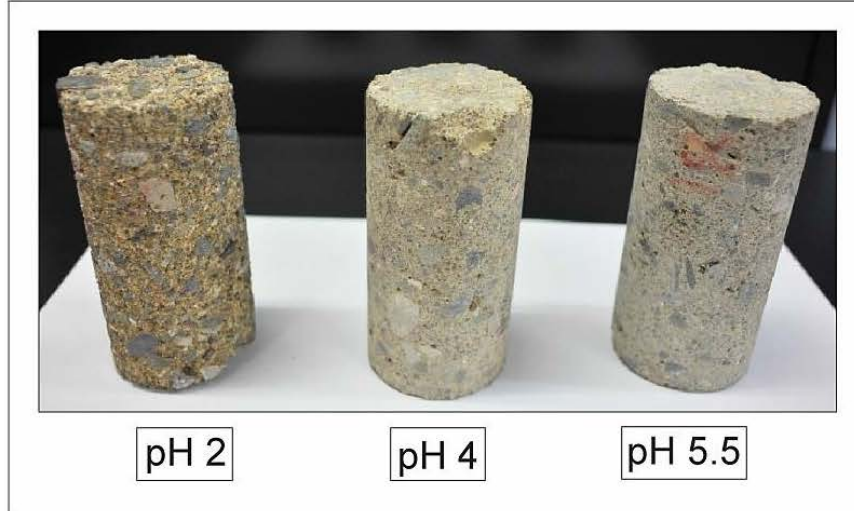


Figura 66. Muestra de las tres muestras expuestas cada una con su valor respectivo de pH.

La muestra de concreto lanzado expuesta al flujo de disolución ácida con pH 2, continuó el ensayo por siete semanas más, para un total de 11 semanas, con el objetivo de observar como evolucionaba su comportamiento en este periodo. Al finalizar presentó un 5,46 % total de pérdida de masa y se caracterizó por el desgaste intenso en la matriz que tiene una tonalidad naranja (Figura 67), esto provocó la caída de agregados de tamaño mediano y expuso a los agregados gruesos, lo cuales se desgranaban con facilidad.



Figura 67. Muestra expuesta un flujo constante de disolución acida con pH 2, por un periodo de 11 semanas.

El ensayo del laboratorio, presentó una pausa en el flujo de agua, por periodos de dos días cada cinco días, por razones de seguridad del laboratorio, por lo tanto, estos periodos se consideran como momentos sin precipitación.

CAPÍTULO V

5.1 Discusión de resultados

En los ensayos realizados en laboratorio y en campo se analizaron los cambios en las propiedades físicas y mineralógicas producidos por el DAR en las muestras del concreto lanzado y las rocas sanas aflorantes de los taludes de la RN-27.

En este capítulo se comparan los resultados de los ensayos que presentan características comunes, en su metodología y en el valor de pH, para entender el comportamiento en cada condición.

5.1.1 Ensayo *In situ* - Ciclo Continuo con muestras de concreto lanzado

La similitud de ambos ensayos, se basa en la continuidad del periodo de exposición a aguas ácidas. En el ensayo *in situ* la muestra estuvo en contacto, por un periodo de 11 meses, con materiales donde se ha demostrado la presencia de DAR debido a la exposición de los minerales sulfurosos del talud con el oxígeno y la humedad del ambiente. Tanto para el ensayo *in situ* como para el del Ciclo Continuo en el laboratorio.

El ensayo de Ciclo Continuo es de tipo acelerado, con un periodo cercano a los 3 meses, donde las muestras estuvieron en un medio saturado de disolución ácida, con un control diario del valor de pH, a una temperatura ambiente constante de aproximadamente 23°C y sin ningún tratamiento abrasivo.

A las muestras de concreto lanzado que se utilizaron en ambos ensayos, se les tomaron las medidas iniciales y finales de sus propiedades físicas y de acuerdo al valor similar de pH a las que fueron expuestas, se compararon entre ellos.

Muestras en el Ciclo Continuo

Las muestras que se encuentran en la disolución ácida de pH 2, presentaron una pérdida de masa de 2,13%, sin cambios significativos en las dimensiones. Debido a las condiciones acuosas de este ensayo, se desarrollaron libremente cristales de yeso con hábito acicular que crecen de manera esporádica sobre la superficie de las muestras, y se da fácilmente la caída de residuos finos, provocando una disminución en la masa. Los productos de la reacción (yeso y etringita), se mantienen sobre la matriz de la muestra, y posterior al proceso de secado, estos se adhieren a la muestra formando la pátina, la cual se comporta como un ligante, brindando firmeza a la muestra y esta no se desgrana con facilidad al cortarla para otros análisis.

En el análisis mineralógico microscópico se observa la ocurrencia de yeso y etringita en el borde de los agregados gruesos, corroborado con el análisis espectral de estos. Estos minerales también se observan en el campo, donde su formación y aparición ha sido documentada, como se observa en la Figura 68, sobre las cunetas y en las zonas bajas de los taludes donde hay presencia de DAR.

En las muestras expuestas a disolución ácida pH 4, hubo una pérdida de 1,47% de masa, sin embargo no se observó ninguna alteración en la superficie de estas, ni cambios mineralógicos.

Basado en las observaciones para este ensayo y los resultados obtenidos para las muestras inmersas en disolución con pH 2 y pH 4, se considera que la disminución de masa y alteraciones en la muestra, se debe a que entre mayor acidez de la disolución, más intenso es el ataque al componente calcáreo que provoca el desgaste de la muestra.



Figura 68. Depósitos de yeso y etringita en cunetas del talud derecho del estacionamiento km 38+600

Muestras del ensayo *In situ*

De acuerdo con Ruiz et al., (2015a), los taludes del estacionamiento del km 38+600 presentan un valor de $\text{pH} \leq 5,5$. Como resultado del ensayo se obtuvo una pérdida de masa de 0,71% en promedio entre los taludes izquierdo y derecho. Cabe destacar, que en el estacionamiento km 38+600, existe un contraste entre ambos taludes. En el izquierdo, el sitio de colocación de muestras tiene menor presencia de DAR, por lo tanto, no se evidenciaron mayores alteraciones, además de un aumento de 0,34% de masa, posiblemente por material externo adherido a la muestra. Caso contrario es el talud derecho, en el cual hay mayor presencia de DAR y su efecto es evidente en las características del talud y la pared de concreto lanzado del sitio. Lo cual también fue reflejado en las muestras enterradas en este talud, en un lugar con alta presencia de humedad, pues tuvieron mayor desgaste de la matriz, con una pérdida de 2,29 % de masa y una formación de pátina delgada de óxidos y sulfatos, provenientes de las aguas ácidas con las que entraron en contacto.

De los tres estacionamientos, es el km 47+000, el que tiene menor presencia de DAR, y como resultado las muestras presentaron el menor cambio de masa, con una pérdida de 0,46%. A pesar de esto, se desarrolló en las muestras una delgada pátina de óxidos y sulfatos los cuáles no cubrían ni afectaban los agregados gruesos.

Los taludes del estacionamiento del km 48+000, presentan un pH promedio de 2,8 (según Ruiz et al., 2015c). De acuerdo con los resultados del ensayo *in situ*, las muestras tienen en promedio un aumento de masa de 1,07%; debido a que desarrollaron una pátina gruesa de óxidos de hierro y sulfatos que provienen de las

aguas ácidas con las que entran en contacto, además se observaron fracturas y un leve aumento en sus dimensiones con 2,09% en el diámetro y 2,98% en la longitud.

Entre las muestras de laboratorio y de campo, las diferencias en los cambios de masa y dimensiones, a pesar de la cercanía del valor de pH, se deben a que las primeras, al estar en una solución acuosa se da la caída de residuos, el desgrane y la sustitución de la matriz por sulfatos de calcio que dan una tonalidad blancuzca a la muestra, y que disminuyen la masa; de lo contrario las muestras utilizadas en el campo, al estar en un ambiente confinado en materiales con alta acidez, los productos de la interacción con aguas ácidas, como los sulfatos y óxidos quedan adheridos a la muestra, dando una tonalidad anaranjada y aumentando la masa.

Con referencia al análisis de un segmento de pared de concreto lanzado tomado del estacionamiento km 38+600 realizado por Ruiz et al., (2015a), en el que se describe el lado interno que está en contacto con el DAR del macizo rocoso y el lado externo expuesto a la intemperie. Las muestras de concreto lanzado utilizadas en el Ciclo Continuo, se asemejan al lado externo de la pared en el cual se da la caída de material y la reducción de su masa. En el caso de las muestras del ensayo *In situ*, al encontrarse confinadas dentro en el suelo ácido se asemejan a la parte interior de la pared que están en contacto directo con el macizo rocoso que presenta DAR, el cual tiende a aumentar su masa por el desarrollo de una pátina, que sustituye en superficie a la matriz.

De acuerdo con los análisis microscópicos realizados para ambos ensayos, las muestras del ensayo en campo y las muestras expuestas a disolución de pH 2 en laboratorio, presentaron bordes de alteración con yeso y etringita de los agregados, y en el matriz óxidos con concentración de hierro. Esto significa una disminución en

el sostén de los agregados gruesos, ya que, al ser un mineral fibroso y frágil provoca fácilmente el desgrane de la muestra. Se concluye según los resultados obtenidos, que los mayores cambios en las propiedades de los materiales se dieron en las muestras expuestas a mayor acidez.

5.1.2 Ensayo de Ciclo Alternado – Ensayo de Ciclo Continuo

Se compararon los dos ensayos principales realizados en el laboratorio, con la misma duración cercana a los 3 meses. El Ciclo Alternado tiene cuatro mediciones intermedias y las muestras son expuestas a procesos de abrasión y cambios térmicos, con valores de pH 2,0, pH 4,0 y pH 5,5, este último valor representa el pH similar al de la lluvia ácida. El Ciclo Continuo no tiene interrupciones, ni tratamientos abrasivos y fue inmersa en disoluciones con pH 2,0 y pH 4,0.

En el Cuadro 42, se puede observar los diferentes cambios de masa para cada tipo de muestras en los dos ensayos y su valor de pH respectivo.

Cuadro 42. Comparación de cambio de masa y volumen, según tipo de ensayo.

Ensayo	Cambio de masa para cada valor de pH					
	pH 2		pH 4		pH 5,5	
	Masa (g)	Vol. (g/cm ³)	Masa (g)	Vol. (g/cm ³)	Masa (g)	Vol. (g/cm ³)
Concreto						
C. Continuo	-2,13%	-5,13%	-1,47%	-3,06%	-	
C. Alternado	-47,64%	-	-1,63%	-0,12%	-1,49%	-1,89%
Brecha						
C. Continuo	-8,75%	-7,64%	-7,76%	-5,78%	-	
C. Alternado	-8,26%	-5,79%	-8,45%	-6,69%	-6,10%	-5,04%
Andesita						
C. Continuo	-0,13%	+2,05%	-0,09%	+2,46%	-	
C. Alternado	-0,12%	+4,19%	-0,06%	+2,75%	-0,09%	+1,91%

Concreto Lanzado - Muestras en disolución pH 2.

El efecto más severo por la exposición a la disolución ácida se observó en las muestras de concreto lanzado inmersas en disolución de pH 2 para ambos ciclos.

En el Ciclo Alternado, las muestras presentaron un severo desgaste que se caracterizó por el desarrollo de fracturas profundas que junto a la disolución de la matriz y la caída de agregados principalmente finos, resultó en una pérdida de masa de hasta 47,64% y una disminución significativa en sus dimensiones de 8,69 % en el diámetro y 11,35% en la longitud y no se obtiene un valor de volumen ya que por el desgaste intenso que presentaba, la muestra podía desintegrarse por la manipulación. En las muestras del Ciclo Continuo, no hubo formación de fracturas, por esto la disolución ácida no profundizó en la muestra y su alteración se limitó a la superficie, donde se observó la cristalización y depositación de yeso y etringita que formaron una pátina de sulfatos, que sustituía la matriz en la superficie y producía caída de algunos agregados, ocasionando una reducción en la masa de 2,13% y el volumen se redujo un 5,13%.

La razón principal por la que el Ciclo Alternado presentó la mayor pérdida de masa y la casi desintegración de las muestras de concreto, se debe a la exposición en los ciclos intermedios, a tratamientos abrasivos y cambios térmicos, que provocan la dilatación y la contracción del material principalmente alrededor de los agregados gruesos, en la circunferencia superior e inferior, generando fracturas y que provocan que la disolución ácida profundice en la muestra. A diferencia del Ciclo Continuo, en donde los productos de la reacción del ácido con la superficie quedan adheridos a la muestra y no forman fracturas.

En el análisis microscópico de la pátina de las muestras de ambos ciclos, se observó la cristalización de yeso y etringita principalmente en los bordes de los agregados gruesos y en algunas fracturas. Esto ocasiona que los espacios vacíos se agranden y los agregados caigan fácilmente, produciendo el desgrane de la muestra. Microestructuralmente, en ambas muestras se observa la formación de cristales aciculares alrededor de los agregados gruesos y con concentraciones altas en calcio, azufre y sílice, componentes principales de la etringita y el yeso.

Se realizó un control diario a los cambios del valor de pH de las distintas disoluciones ácidas y se obtuvo información sobre la capacidad de reacción que tiene el componente carbonato de calcio de la muestra sobre el ácido sulfúrico. Para efectos de laboratorio, si aumenta el valor de pH, significa que el ácido ha entrado en reacción con el componente calcáreo, y si éste se mantiene estable, refleja la poca o nula reacción con la muestra. Entre menos ácida sea la disolución, el efecto de la reacción tomara mayor tiempo en evidenciarse. En una disolución de mayor acidez, el ácido ataca fuertemente el componente calcáreo y lo consume, y conforme disminuye la cantidad de carbonatos el valor de pH ácido se estabiliza, ya que no tiene más carbonatos para reaccionar.

Para el Ciclo Alternado, la disolución con valor de pH 2, varía de manera importante a lo largo del periodo del ensayo, ya que en cada ciclo se da la exposición de nueva superficie, ocasionado por el proceso de abrasión de la muestra. Inicialmente después del primer cambio importante del pH, este comienza a estabilizarse por la pérdida de superficie con componente calcáreo, y seguido al ciclo de abrasión y secado, el ácido vuelve a reaccionar con facilidad ya que entra en contacto nuevamente con superficie inalterada. Esto varía por los puntos de rotura en la

muestra, donde más componente calcáreo es expuesto y por lo tanto la reacción se activa nuevamente. Para el Ciclo Continuo, para la disolución de pH 2, al inicio de la inmersión este presentó un alto nivel de reacción, reflejado en los cambios de pH, que con el pasar del tiempo al haberse consumido todo el componente calcáreo superficial, la acidez de la disolución llegó a una relativa estabilización. Al no existir abertura de fracturas el efecto no profundiza y el ácido consume todos los carbonatos solamente de la superficie, donde se desarrolla la pátina, la cual mantiene estable el valor de pH.

Concreto lanzado - Muestras en disolución pH 4.

En estas muestras hubo una reducción en su masa de 1,63% y en el volumen de 0,12% y presentaron fracturas en la circunferencia superior e inferior provocados por los cambios térmicos y el leve crecimiento de yeso en su superficie. En el Ciclo Continuo tuvo una pérdida de masa de 1,47% y 3,06% menos de volumen, el cual no presentó fracturas ni otras alteraciones, a excepción del depósito de cristales diminutos de yeso sobre el recipiente.

Entre ambos ensayos, la mayor pérdida de masa se da en el Ciclo Alternado el cual presenta procesos abrasivos y de cambios térmicos que provocan mayores cambios en las características originales, como la abertura de fracturas.

Mineralógicamente, es en las muestras del Ciclo Alterando donde se observa el desarrollo del borde de yeso y etringita en los agregados gruesos, y en el Ciclo Continuo aún se observan carbonatos en cristales y vetillas que no fueron afectados por el ácido.

Concreto lanzado - Muestras en disolución pH 5,5.

En el caso de la disolución de pH 5,5, que es el valor más bajo de acidez encontrado en los taludes de acuerdo con Ruiz et al., (2015c), este también es similar al de la lluvia ácida. Al querer recrear el efecto de la lluvia ácida sobre las muestras, solo se utilizó ese valor en el ensayo de Ciclo Alternado, el cual presenta ciclos de cambios térmicos y abrasivos que normalmente ocasionan la precipitación sobre los materiales.

De acuerdo con los resultados, hubo una pérdida de masa de 1,49% y de volumen de 1,89%, siendo la menor pérdida de masa en todos los ensayos. Presentaron grietas pequeñas principalmente en la circunferencia superior e inferior, consecuencia de los cambios térmicos. En el análisis microscópico, no se observaron cambios en su mineralogía. En general para estas muestras, no hubo un efecto significativo en las propiedades físicas ni mineralógicas de las muestra al ser un valor de baja acidez y por esta razón no consume la totalidad del componente calcáreo.

Brecha volcánica - Muestras en disolución pH 2

Las muestras de brecha volcánica presentaron una disminución de masa para el Ciclo Alternado de 8,75% con una pérdida de volumen de 5,79% y el Ciclo Continuo presentó un 8,26% menos de masa y 7,64% menos de volumen.

Para ambos ensayos los cambios de masa fueron similares, sin embargo, debido a que mineralógicamente y físicamente no presentaron alteraciones significativas, ni

fracturamiento intenso, se considera que esta pérdida de masa se debe a la caída en la primera inmersión, de material fino externo adherido a la muestra previamente. Esta consideración se da a raíz, de que en el ensayo de Ciclo Alternado, se obtiene una reducción de 7,98% en la masa en el ciclo 1 y en el ciclo 2 la reducción es de 0,59%. Además la pérdida de masa en todos los ensayos, ya sean de campo o de laboratorio, son entre 7,00% y 8,00% y no se observa desgaste aparente en estos, con excepción de la oxidación de algunos componentes calcáreos en la superficie. Por esta razón es importante la limpieza inicial de las muestras.

En el análisis mineralógico en ambas muestras se observan vetillas y fenocristales de carbonatos no alterados, lo que indica que la disolución ácida no profundizó en la muestra. Además, según al análisis microestructural de la muestra utilizada en el Ciclo Continuo, esta mantiene concentraciones elementales similares a su condición sana, lo que confirma que no se ocurrió ningún cambio mineralógico en las muestras.

La disolución con pH 2 que estuvo en contacto con la brecha, mantuvo el valor de pH relativamente estable, con cambios pequeños en los dos ensayos, indicando la leve reacción del ácido con los componentes de la muestra, debido a la poca concentración de componentes calcáreos en su superficie.

Brecha volcánica - Muestras en disolución pH 4

Para las muestras expuestas a disolución con pH 4, la mayor pérdida de masa se dio en el Ciclo Alternado en un 8,45% y en el Ciclo Continuo hubo una pérdida de 7,76%. Por lo tanto la diferencia entre ellos se debe a los procesos de abrasión que tiene el primer ensayo y posiblemente la disolución de mayor cantidad de carbonatos en superficie, ya que además este tuvo una disminución en el volumen de 6,69% a diferencia del 5,78% menos de volumen en la muestra del Ciclo Continuo.

De acuerdo al análisis microscópico, en ambas muestras, no se observan alteraciones mineralógicas y mantiene su composición original en estado sano.

Brecha volcánica - Muestras en disolución pH 5,5

La muestra expuesta a la disolución ácida con pH 5,5 presenta la menor pérdida de masa de todas las muestras de brecha volcánica utilizadas en este estudio, lo que corresponde con la menor acidez de la disolución y demuestra la leve reacción con el componente calcáreo de la superficie de la muestra.

Los cambios diarios del valor de pH en las disoluciones con pH 4 y 5,5, superaban el +0,5 de rango, reflejando la leve reacción del ácido con el componente calcáreo de la superficie de la muestra.

Andesita - Muestras en disolución pH 2, pH 4 y pH 5,5

De acuerdo con los resultados de ambos ensayos, se observó un cambio de masa menor al 1% en todas las muestras inmersas en las tres disoluciones, por lo tanto se considera nulo este cambio de masa. El leve aumento del volumen que se observa principalmente en la muestra inmersa en pH 2 del Ciclo Alternado, se da posiblemente por la manipulación y tratamiento que presenta la muestra en los ciclos intermedios y para las demás disoluciones este cambio de volumen se considera no significativo. De la misma manera, no se observaron cambios en las dimensiones en ninguna de las muestras.

Estas muestras no presentaron cambios en sus propiedades físicas ni mineralógicas, principalmente por carecer de componentes calcáreos con los cuales el ácido pueda reaccionar. Es por esta razón el valor de pH se mantiene estable durante todo el periodo.

5.1.3 Ciclo Alternado - Ensayo de Ducha ácida en campo

El Ciclo Alternado tiene en común con el ensayo de Ducha ácida en campo, que ambos se encontraban expuestos a cambios de temperatura y a procesos de abrasión por un periodo de aproximadamente 3 meses. A pesar de que en el ensayo de Ciclo Alternado estos factores eran controlados y determinados por ciclos intermedios y en el segundo ensayo, las muestras se exponían a las condiciones ambientales del sitio, sin ningún control.

Se compararon los diferentes cambios de masa para los dos tipos de ensayo a pH similares. Por lo tanto, como las muestras de brecha volcánica y concreto lanzado colocadas en el talud derecho del estacionamiento km 38+600, fueron expuestas a un goteo constante de agua ácida con valor de pH 3,24 y las muestras de andesita y concreto lanzado del estacionamiento km 45+00, a un pH 3,33, entonces se asemejan a las condiciones intermedias entre el pH 2 y pH 4 en el laboratorio.

De acuerdo con los resultados, la pérdida de masa del concreto lanzado en las muestras en el campo y el laboratorio fue prácticamente la misma, la primera que fue expuesta en el estacionamiento km 38+600, tuvo una pérdida de masa de 2,65% y la segunda tuvo una disminución de 2,5%. El principal cambio de las muestra en laboratorio fue la formación de fracturas, además de que no presentó ningún cambio en su tonalidad; en contraste la muestra de campo se observó un mayor desgaste en su matriz y oxidación que la muestra en el laboratorio y con una tonalidad naranja por los óxidos de las aguas ácidas a las que fue expuesta y posiblemente porque estuvo expuesta a un tipo de abrasión más intensa.

La brecha volcánica colocada en este sitio tuvo una pérdida de 7,62% de masa, similar a la disminución que presentó la muestra utilizada en el laboratorio con un pH 4, con un 8,45%. Sin embargo como se ha comentado con anterioridad, este valor de cambio de masa pudo significar la caída de material externo adherido previamente a la muestra, ya que no hay un desgaste evidente en la muestra, y la muestra de campo lo que presenta es una tonalidad rojiza por el contacto de aguas ácidas del sitios las cuales contienen óxidos que se adhieren a la muestra.

Las muestras de andesita y concreto lanzado colocadas en el estacionamiento km 45+000, presentaron un aumento de masa de 0,25% y 0,31% respectivamente. Debido a la caída de material erosionado del talud, estas estuvieron un lapso de tiempo indefinido enterradas en suelo ácido con alta humedad. Esta condición

permitió en la muestra de concreto lanzado el desarrollo de una pátina gruesa compuesta por sulfatos y óxidos de hierro provenientes de las aguas ácidas con las que entró en contacto.

La muestra de andesita mostró una tonalidad a rojiza debido a los óxidos de hierro adheridos en su superficie, y depósitos blancuzcos provenientes de los suelos y aguas ácidas con los que estuvo en contacto.

5.1.4 Ensayo de Ducha ácida de campo y Ducha ácida de laboratorio

Estos dos ensayos tienen en común el mecanismo de contacto de la muestra con las aguas ácidas, donde en los dos ensayos la muestra fue colocada bajo un flujo de agua ácida, la cual producía un efecto abrasivo sobre la muestra.

Sus diferencias metodológicas radican en el periodo de tiempo de exposición de las muestras. El ensayo en campo tuvo un periodo de 3 meses y el de laboratorio fue por un periodo de 1 mes, ya que se trata de un ensayo acelerado. Además de que las condiciones en el campo, como ya se ha mencionado, no son controlables y las muestras están expuestas a las condiciones de oxígeno, humedad, abrasión del ambiente y precipitaciones. El ensayo de Ducha ácida en el laboratorio, tuvo un control diario del pH y fue afectado únicamente por la abrasión del flujo de agua constante generada por la bomba colocada en el recipiente, sin embargo la temperatura y la oxigenación tampoco fueron controladas. El equipo en laboratorio era apagado por dos días a la semana cada cinco días, por motivos de seguridad del laboratorio y para recrear momentos donde no hay precipitación. En este ensayo, el flujo constante de drenaje ácido, recrea un mecanismo de erosión fluvial

que arrastra los granos finos, desgastando la matriz y exponiendo superficie nueva, donde el ácido vuelve a atacar profundizando el efecto.

De acuerdo a las observaciones, y el análisis de los resultados, las muestras de los estacionamientos km 38+600 y 45+000, presentaron valor de pH el día de colocación de pH 3,24 y pH 3,33 respectivamente. Con cambios principalmente en el desarrollo de la pátina de sulfatos y óxido provenientes de las aguas ácidas con las que entran en contacto.

Para las muestras utilizadas en el laboratorio, de acuerdo con los resultados, la pérdida de masa y el valor de pH tienen una relación directa, donde a mayor acidez, mayor será la pérdida de masa en la muestra. Otro factor que varía de acuerdo al grado de acidez es la coloración de la muestra; en el caso de la muestra colocada bajo disolución de pH 2, presenta una tonalidad naranja en la mayoría de los agregados finos, este cambio de tonalidad se da con menor intensidad a menor acidez de la disolución. En las muestras de campo, al estar en contacto con suelo ácido que provoca la adición de los óxidos de hierro en ellas, entonces la tonalidad rojiza se intensifica.

5.2 Conclusiones

A partir de los objetivos cumplidos de esta investigación, se presentan las siguientes conclusiones:

Para el cumplimiento del objetivo N°1 de esta investigación: Analizar los cambios de la masa y dimensiones de las muestras de roca y del concreto, tanto en el laboratorio como en el sitio elegido en el campo, para la cuantificación del efecto del DAR en un tiempo determinado. Se concluye:

1. De las propiedades físicas consideradas, la masa presentó los cambios más significativos en los ensayos de laboratorio y de campo. Las dimensiones de las muestras, en su mayoría no presentaron cambios importantes, pues éstas fueron menores al 1% en diámetro y longitud.
2. El mayor cambio en las propiedades físicas ocurrió en el concreto lanzado del ensayo de Ciclo Alternado con disolución ácida pH 2. Tuvo una disminución de 47,64% de masa, 8,73% de diámetro y 11,85% de longitud en las dimensiones. Esto es producto de un desgaste intenso en la matriz que ocasionó el desgrane casi total de la muestra.

De los ensayos en campo, se observó el mayor cambio de masa del concreto lanzado en el ensayo de Ducha ácida del estacionamiento 38+600, donde la muestra fue expuesta a aguas ácidas con pH 3,24. Tuvo una disminución de masa de 2,65% y sin cambios significativos en las dimensiones. Se observó desgaste de la matriz y desarrollo de una pátina con tonalidades rojizas y naranjas, típicas de depósitos de óxidos y sulfatos.

A partir de estos resultados, se concluye que los mayores cambios en las propiedades físicas de las muestras de concreto lanzado se dan en ambientes de alta acidez ($\text{pH} \leq 4$) y donde sean afectados por procesos abrasivos que profundizan el desgaste, tanto en laboratorio como en campo.

3. De todos los tipos de muestras ensayadas, la brecha volcánica presentó la mayor pérdida de masa. En las muestras expuestas a disolución de pH 2 en laboratorio, se observaron vesículas vacías y la abertura de grietas por la disolución de los carbonatos que las rellenaban. Para los demás valores de pH, la roca mostró la oxidación de estos componentes pero no la disolución, sin embargo tienen reducciones de masa parecidas (de 7,76% hasta 8,75%). En el ensayo de Ciclo Alternado, se observó que el mayor cambio de masa ocurrió en el ciclo 1 (8,26%), en los siguientes ciclos, hubo pérdidas menores al 1%. Por lo tanto, se concluye que la pérdida de masa, para esta y las demás muestras en otros ensayos, se debió a la caída de material fino en la primera inmersión.
4. Las muestras de andesita presentaron cambios mínimos o nulos en sus propiedades físicas. Esto se debe a su alteración mineralógica silicificada que carece de minerales carbonatados que reaccionen con el ácido sulfúrico.

Para el cumplimiento del objetivo N°2 de esta investigación: Describir las características mineralógicas de la roca y del concreto lanzado, en microscopía para el análisis del efecto del DAR en sus componentes. Se concluye:

1. Los resultados de los análisis microscópicos y microestructurales en las muestras de concreto lanzado determinan la presencia de yeso y etringita, principalmente en las expuestas a valores de $\text{pH} \leq 4$. Se forman principalmente en las fracturas,

en los bordes de los agregados y sustituyendo la matriz. Al ser minerales fibrosos y de baja dureza, los sitios donde se forman se convierten en zonas de debilidad, ya que aumentan del volumen de las fracturas y espacios vacíos, estimulando la disgregación del concreto.

2. Las muestras de brecha volcánica se caracterizaron por poseer una matriz arcillosa con altas concentraciones de sílice, clastos andesíticos, vetillas y fenocristales de carbonatos. Posterior a la exposición al ácido con pH 2, macroscópicamente se observó la disolución de estos carbonatos en vetillas y en los clastos que se exponían en la superficie. En $\text{pH} \geq 4$, estos componentes carbonatados se observaron oxidados con tonalidades naranja. De acuerdo con los análisis microscópicos, la parte interna de las muestras no fue afectada, debido a que la poca porosidad limitó solo a la superficie el efecto del ácido. Al ser la brecha volcánica una roca heterogénea de textura gruesa, dificulta la comparación y su análisis entre las diferentes muestras.

3. La muestra de roca andesítica no presentó cambios mineralógicos, debido a la carencia de componente calcáreo, por lo tanto, no reacciona con el ácido. Únicamente en el ensayo de Ducha ácida de campo, presentó adherencias de óxidos de hierro y sulfatos en su superficie, provenientes de las aguas ácidas con las que entró en contacto, sin cambiar sus propiedades físicas ni mineralógicas.

Para el cumplimiento del objetivo N°3 de esta investigación: Evaluar la metodología desarrollada del efecto del DAR en roca sana y concreto lanzado comparando los resultados del laboratorio y del campo para validarla. Se concluye:

1. De acuerdo con los resultados en los ensayos de laboratorio y de campo, se obtiene que el concreto lanzado con resistencia a la compresión a 28 días de 280 kg/cm² (Cuadro 5), es el material más susceptible al ataque del DAR. Este material en contacto con disoluciones ácidas de pH ≤ 4, presentó desgaste y oxidación de la matriz, fracturación y depósitos de yeso y etringita como producto de la reacción al consumir el componente calcáreo de la muestra.

En ambientes con acidez de pH 4 ≤ pH ≤ 5,5 tanto en los ensayos de campo como en los de laboratorio, se observa cambios de menor intensidad. Por lo tanto, se puede considerar que el concreto lanzado tiene mayor resistencia a corto plazo para aguas de acidez menor con pH ≥ 5,5, sin embargo, esto solo alarga el impacto del DAR, ya que con mayor tiempo de exposición a medios ácidos, los efectos pueden ser importantes.

2. En la brecha volcánica en los ensayos de laboratorio y de campo, el impacto ocurrió en la superficie de la muestra con la oxidación y disolución de carbonatos dentro de los clastos y en vetillas. Por lo tanto, se considera que es necesario mayor tiempo de exposición para recrear un efecto de degradación como el que se observa en la brecha que ha estado expuesta al DAR desde que se realizó el corte en la carretera.

3. En las muestras de roca andesítica en todos los ensayos se mostró un cambio de masa y dimensiones no significativo o nulo, confirmando que las características de silicificación de la roca limita la reacción con las aguas ácidas. Sin embargo, en la muestra expuesta al campo se observó un cambio de tonalidad en su superficie debido a depósitos de óxidos y sulfatos provenientes de las aguas ácidas cargadas con estos componentes.

4. El tratamiento abrasivo en los materiales, es el factor que estimula la profundización del desgaste y la aceleración del efecto del DAR en la muestra. Esto se refleja en la mayor pérdida de masa ($\geq 2,00\%$) de las muestras de concreto lanzado utilizadas en los ensayos de Ciclo Alterno, Ducha ácida de campo y Ducha ácida del laboratorio.

En el campo el tratamiento abrasivo se da por la erosión eólica o hídrica, por lo tanto extrapolando los resultados del ensayo de Ciclo Alternado, se puede explicar porque la pared de concreto lanzado expuesta al DAR podría disminuir su espesor.

5. El cambio en la coloración de tonalidades gris a rojos y naranjas, que se observa principalmente en las muestras de campo y muy leve en las muestras que se sometieron al ensayo de ducha ácida en laboratorio con una disolución de pH 2, se debe a la oxidación que las afecta, y la adherencia de sulfatos y componentes que se concentran en las aguas ácidas con las que entran en contacto.

6. A pesar de que el ensayo en campo, tiene variables no controladas, como la oxigenación, humedad, precipitación y temperatura, los resultados concuerdan con los de laboratorio. Entre mayor acidez este expuesto el material, tendrá

mayores cambios en su estructura apoyado por los tratamientos abrasivos. Se confirma que el ensayo acelerado en el laboratorio es válido y reproducible para el análisis del efecto del DAR.

Conclusiones Generales

1. Se cumple la hipótesis de este estudio, al demostrarse que ocurren cambios físicos y mineralógicos en las rocas sanas que afloran en las inmediaciones de la RN-27 y en el concreto lanzado diseñado y proyectado con las mismas especificaciones del que es utilizado para cubrir los taludes, cuando entran en contacto de soluciones ácidas que simulan las condiciones del DAR, así como en sitios en el campo donde se ha demostrado a presencia de DAR con diferentes grados de acidez. También se confirma con el caso de la roca andesítica, que si el material carece de componente calcáreo en su estructura, no ocurren cambios en sus propiedades.
2. Se considera que el concreto lanzado con las mismas especificaciones utilizadas en la RN-27 no es apto para utilizarlo en los taludes en zonas que presenten DAR. Por su composición, es un material muy susceptible a alteraciones en sus propiedades en contacto con ambientes ácidos. Este proceso se acelera a mayor acidez, cambios térmicos y tratamientos abrasivos, que estimulan la formación de fracturas, donde se depositan minerales fibrosos como yeso y etringita, que expanden los espacios vacíos y provocan el desgrane del material.
3. De acuerdo con los resultados de los ensayos en la brecha volcánica, se considera que el efecto del DAR en el macizo rocoso de este tipo de roca, depende principalmente de la densidad de la red de vetillas de carbonatos que presente, ya que su disolución ocasiona la abertura de fracturas y creación de

zonas de debilidad, provocando que el DAR profundice el macizo y junto con otros factores ambientales, disminuyan sus características de sostén.

En el estacionamiento km 38+600, esta roca se observa severamente impactada, debido posiblemente a la concentración de carbonatos que presenta su composición, la cual es irregular por ser una roca muy heterogénea, aunado al tiempo de exposición al oxígeno y la humedad, y la presencia de DAR en el sitio.

4. En las muestras de roca andesítica, no se evidenciaron alteraciones en las pruebas de laboratorio ante la carencia de carbonatos que reaccionen con el ácido. Sin embargo, el estacionamiento del km 48+000 donde aflora este tipo de roca, está severamente impactado principalmente en la zona central del talud ya que en este sitio las rocas no están silicificadas. Por lo tanto, de acuerdo con el cumplimiento de la hipótesis, si presentan componente calcáreo en su composición, se verán afectados por el contacto con aguas ácidas, además de factores ambientales variantes.

5. Se elaboró un “Manual para la caracterización del efecto del drenaje ácido de roca en las rocas aflorantes y en el concreto lanzado de los taludes de la ruta nacional No. 27 (San José – Caldera)”, que se considera como una metodología repetible y reproducible en materiales que estén en contacto con aguas ácidas. Además es la base de una línea de investigación en materiales y normas que resistan el efecto del DAR en taludes de carretera.

5.3 Recomendaciones

Del estudio realizado se generan las siguientes recomendaciones:

- 1) En la realización de los ensayos y mantener control sobre los cambios de propiedades de las muestras, se recomienda lavar con especial cuidado las muestras de roca y concreto al inicio del ensayo y previo a la medición de sus propiedades, para eliminar el exceso de polvo y material externo adherido a las muestras sin dañarla.
- 2) En futuros ensayos, se recomienda realizar la medición de las propiedades mecánicas de las muestras de acuerdo a las normas ASTM respectivas. Además, para obtener mayor información sobre la capacidad de profundización del ácido en la muestra, realizar análisis de porosidad en ellas.
- 3) Las muestras al estar colocadas en el campo por un largo periodo, deben ser etiquetadas cuidadosamente, y tener su respectiva ubicación registrada, para evitar el robo o pérdida por algún efecto natural o deslizamiento que las cubra.
- 4) Para la practicidad del ensayo y el aseguramiento de la estabilidad del valor de pH de la disolución ácida, se puede utilizar un búfer químico y así la muestra este expuesta al mismo valor de pH en todo el periodo.
- 5) En cuanto al análisis de las muestras de roca a nivel microscópico, si se quisiera observar mayor área de la muestra, se recomienda realizar las secciones delgadas colocadas en portavidrios cuadrados. Además las secciones deben ser la de la superficie de la muestra, donde tuvo mayor impacto.

- 6) Para optimizar el uso del microscopio electrónico, se recomienda que todas las muestras tengan la misma altura (máximo 15 mm), así sean analizadas entre dos o tres muestras al mismo tiempo. Sin embargo, se debe tomar en consideración que el peso total de las muestras introducidas al equipo, no debe sobrepasar los 150 g.

Para mejorar la calidad de las imágenes tomadas con el microscopio electrónico, se recomienda colocar una cobertura de oro en las muestras y para ello estas deben estar completamente secas y con la menor porosidad posible. Entre menor el tamaño de la muestra, la cobertura de adhiere con mayor éxito. Todo este proceso debe ser realizado por un profesional experto en la utilización de este equipo.

- 7) Se recomienda estudiar con detalle las características del yeso y su función en las propiedades mecánicas del concreto al ser un producto de la reacción del ácido sulfúrico con el componente calcáreo del material.
- 8) Se recomienda realizar otros estudios utilizando la misma la metodología y condiciones sugeridas en esta investigación, en diferentes tipos de concretos tratados especialmente con aditivos y donde se expongan al acero las soluciones ácidas que simulen el DAR en el laboratorio, para cuantificar y registrar el efecto en estos.

6. Referencias

- ARRIETA, L., 2014: Diagnóstico de la actividad minera, Región Central 1. Período 2013 – 2014.- Ministerio de Ambiente y Energía, San José, Costa Rica.
- ASOCIACIÓN COSTARRICENSE DE GEOTECNIA, ACG., 2010: Reporte de inspección geotécnica de los taludes de corte entre las estaciones 14 + 000 a 52 + 000 Ruta 27 San José - Caldera.- 49 pp. Publicación AGC, 0110 San José Costa Rica.
- ASTM C1723., 2016: Standard guide for examination of hardened concrete using scanning electron microscopy, ASTM International, West Conshohocken, PA.
DOI: 10.1520/C1723-16
- ASTM C1604M-05., 2012: Standard test method for obtaining and testing drilled cores of shotcrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.-
DOI: 10.1520/C1604_C1604M-05R12.
- ASTM C856., 2017: Standard practice for petrographic examination of hardened concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/C0856-17
- ASTM C39M-17a., 2017: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA.
DOI: 10.1520/C0039_C0039M-17A
- ATTIOGBE. E.K. & RIZKALLA, S.H., 1988: Response of concrete to sulfuric acid attack.-8 pp. ACI Materials Journal. Title no. 85-M4.

- AYDIN S., YAZICI, H, HU" SEYIN YIG" ITER & BU" LENT BARADAN., 2007: Sulfuric acid resistance of high – volume fly ash concrete.- *Building and Environment* 42 (2007) 717–721. Dokuz Eylu" I University, 35160 Buca, Izmir, Turkey.
- CHAN, J.L., SOLIS, R. & MORENO, E., 2003: Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto.- *Ingeniería* 7-2 (2003) 39-46
- CHANG, Z, SONGA, X,J., MUNNA, R & MAROSSZEKY, M., 2005: Using limestone aggregates and different cements for enhancing resistance of concrete to sulphuric acid attack.- *Cement and Concrete Research* 35 (2005): 1486 – 1494.
- CONSEJO NACIONAL DE CONSESIONES, 2016: CNC-APM-SJO-OF-2016-0836.- 90pp. Consejo Nacional de Consecciones, San Jose Costa Rica.
- DENYER, P. & ARIAS, O., 1991: Estratigrafía de la región Central de Costa Rica.- *Rev. Geol. Amér. Central*, 12: 1-59.
- DOLD, B., 2010: Gestión de residuos y minería sostenible. Basic concepts in enviromental geochemistry of sulfidic mine-waste management.- 37 pp. Universidad Internacional de Andalucía.
- FATTUHI, N.I & HUGHES, B.P., 1983: Effect of acid attack on concrete with different admixtures or protective coating.– 11 págs. *Cement and Concrete Research*. Vol. 13, pp. 655-665. Printed in the USA. University of Birmingham, England.
- FATTUHI, N.I & HUGHES, B.P., 1988: The performance of cement paste and concrete subject to sulphuric acid attack. *CEMENT and CONCRETE RESEARCH*. Vol. 18(1988): 545-553. Printed in the USA.

- FATTUHI, N.I & HUGHES, B.P., 1986: Resistance to acid attack of concrete with different admixtures or coatings.- 8 pp. The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Volume 8, Number 4.
- GARRO, J., VALVERDE, C & SANABRIA, J., 2013: Informe de evaluación del proyecto San José - Caldera. Ruta Nacional No. 27, Año 2012, INF – PITRA – 001 – 2013.- 132 pp. Universidad de Costa Rica. Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR, San José, Costa Rica
- GRANDIA, F., SALAS, J., ARCOS, D., ARCHAMBAULT, A. & COTTARD, F., 2009: Impacto del drenaje ácido de explotaciones mineras en la cuenca del Río Margarita y Embalse de Hatillo (República Dominicana).- Bol. Geol. Minero, 120(4): 595-606.
- HOLDRIDGE, L. R. 1967: Life zone ecology.-206 pp. Tropical Science Center. San José, Costa Rica.
- HILL, J., BYARS, E.A., SHARP, J.H., LYNSDALE, C.J., CRIPPS, J.C. & ZHOU, Q., 2003: An experimental study of combined acid and sulfate attack of concrete.- Cement & Concrete Composites 25: 997–1003.
- KUMAR S. & KAMESWARA C.V.S., 1995: Sulfate attack on concrete in simulated cast-in-situ and precast situation.- Cement and Concrete Research, Vol. 25. No. 1:1-8.
- KERKHOFF, B., 2007: Effects of substances on concrete, guide to protective treatments.- 35 pp. Portland Cement Association. Washington, DC. Estados Unidos.
- MONTENEGRO, J.C., 2008: Efecto de los residuos mineros en la durabilidad del concreto, el caso de soluciones ácidas sulfuradas.- 7 pp. Reporte metalúrgico y de materiales – No. 6. La Paz, Bolivia.

- NARANJO, R., 2013a: Informe corto de fiscalización. Carretera San José – Caldera. Ruta Nacional No. 27. Talud en estacionamiento 38+500, LM-PI-UGERVN-005-2013.- 7 pp. Universidad de Costa Rica. Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR, San José, Costa Rica
- NARANJO, R., 2013b: Informe de fiscalización. Carretera San José – Caldera. Ruta Nacional No. 27. Revisión integral de taludes, LM-PI-UGERVN-007-2013.- 7 pp. Universidad de Costa Rica. Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR, San José, Costa Rica
- ORNDORFF, Z., DANIELS, L. & DIAS, L., 2001: Evaluation of sulfidic materials in Virginia Highway corridors.- *Environmental Geology* 46:209-216.
- PARANDE, A.K., RAMSAMY, P.L., ETHIRAJAN, S., RAO, C.R.K & PALANISAMY, N., 2006: Deterioration of reinforced concrete in sewer environments.- *Municipal Engineer* 159 Issue ME1.
- POOLE, A. & SIMS, I., 2015: *Concrete petrography a handbook of investigative technique.*- Taylor & Francis Group, FL 33487-2742 CRC Press 2015. Ebook ISBN: 978-1-4665-8382-5. DOI 10.1201/b18688.
- 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.

- RAMIREZ, S., 2008: Propiedades mecánicas y microestructural de concreto conteniendo mucílago de nopal como aditivo natural.- 95 pp. Instituto Politécnico Nacional. Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México. [Tesis MSc.].
- RODRIGUEZ, G., 2010: El sistema de gestión ambiental en el control del drenaje ácido de mina. 315 pp. 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 pp. Univ. de Costa Rica. [Tesis Lic.].
- RUIZ, P., 2006: Prospección, análisis y factibilidad técnica del uso de arcillas como neutralizadores de azufre en la fabricación de *clinker* en CEMEX Costa Rica, - Colorado de Abangares.- 104 pp. Univ. de Costa Rica. [Tesis Lic.].
- RUIZ, P., 2015: Metodología para determinar presencia de drenaje ácido de rocas en taludes de carreteras, caso práctico: Ruta Nacional 27, San José - Caldera, Costa Rica.- XII Congreso Nacional de Geotécnica. San José, Costa Rica.
- RUIZ, P., NARANJO, R., VALVERDE, C., GARRO. & BARRANTES., R. 2015a: Estudio de presencia de drenaje ácido de roca en taludes de la Ruta Nacional 27, LM-PI-UGERVN-003-2015.- 43 pp. Universidad de Costa Rica. Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR, San José, Costa Rica
- RUIZ, P., NARANJO, R., VALVERDE, C., SANABRIA, J., VEGA-SALAS, P., AGÜERO, P., & BARRANTES, R., 2015b: Informe de evaluación y fiscalización, ruta nacional No.27 taludes km 38+600, LM-PI-UGERVN-008-2015.- 116pp. Universidad de

- Costa Rica. Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR, San José, Costa Rica
- RUIZ, P., ARAUZ, A., GARCÍA, J., VILLALOBOS, G., SEDÓ, A & SUÁREZ, C., 2015c: Drenaje ácido de rocas en taludes de la ruta nacional 27, San José - Caldera, Costa Rica.- Rev Geol. Amer. Central, 53: 25-46.
- SERSALE, R., FRIGIONE, G. & BONAVIDA, L., 1998: Acid Depositions And Concrete Attack: Main Influences.-6 pp. Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 1: 19–24. Elsevier Science Ltd Printed in the USA
- SANCHEZ, D., 2001: Tecnología del concreto y del mortero.- 341 p. Pontificia Universidad Javeriana. Bhandar editores Ltda. 5ta Ed. Bogotá, Colombia.
- SERNAGEOMIN., 2015: Guía metodológica para la estabilidad química de faenas e instalaciones mineras.- 248 p. Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile. Chile
- SERNAGEOMIN., 2002: Guía metodológica Drenaje Ácido Industria Minera.- 39 p. Servicio Nacional Geología y Minería de Chile. Chile.
- TIAN, B., AND COHEN, M. D., 2000: Does gypsum formation during sulfate attack on concrete lead to expansion?.- Cement Concrete Research, 30-1: 117–123.
- TIXIER, R., 2000: Microstructural development and sulfate attack modeling in blended cement-based materials.-508 pp. Arizona State University, Estados Unidos.
- TIXIER, R. & MOBASHER, B., 2003: Modeling of damage in cement – based material subjected to external sulfate attack- II: Comparison with experiments.-Journal of Material in Civil Engineering, 15(4): 314-322.

- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) OFFICE OF SOLID WASTE SPECIAL WASTE BRANCH., 1994: Technical document acid mine drainage prediction.- 52 pp. Epa530-R94-036 Ntis Pb94-201829.
- VARGAS, A. & FERNANDEZ, J.F., 2002: Aplicación de una metodología para evaluar la agresividad del agua hacia estructuras de concreto.- Rev Geol. Amer. Central, 27: 125-132.
- VALVERDE, C., GARRO, J., NARANJO, R & RUIZ, P., 2014: Informe de Evaluación del Proyecto San José – Caldera, Ruta Nacional 27 Año 2013 - 2014, INF – PI – UGERVN – 05 – 2014.- 167 pp. Universidad de Costa Rica. Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR, San José, Costa Rica.
- VALVERDE, C., GARRO, J., NARANJO, R & RUIZ, P., 2015: Informe de evaluación del proyecto. San José – Caldera, Ruta Nacional No. 27. LM-PI-UGERVN-014-2014.- 216 pp. Universidad de Costa Rica. Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR, San José, Costa Rica.
- VALVERDE, C., NARANJO, R., RUIZ, P & VILLALOBOS, E., 2016: Informe de evaluación del proyecto. San José – Caldera, Ruta Nacional No. 27, Año 2015-2016. LM-PI-UGERVN-005-2016.- 284pp. Universidad de Costa Rica. Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR, San José, Costa Rica.
- YUAN, H., DANGLA, P., CHATELLIER, P. & CHAUSSADENT, T., 2013: Degradation modeling of concrete submitted to sulfuric acid.- Cement and Concrete Research 53: 267–277.

XIE, S, QIA. L & ZHOU, D., 2004: Investigation of the effects of acid rain on the deterioration of cement concrete using accelerated tests established in laboratory.-Atmospheric Environment 38 (2004) 4457–4466.

7. Anexos

Anexo 1

Datos del control diario del valor de pH en el ensayo de Ciclo Continuo (muestras con código: A1, A2, B1, B2, C02-C03-C04, C05-C06-C07)

Muestra Código: A1				pH: 2		CICLO CONTINUO	
Fecha	Día	pH		Fecha	Día	pH	
		Inicial	Final			Inicial	Final
13-ene	1	1,99	1,99	27-feb	46	2,01	2,01
16-ene	4	2,64	2,06	28-feb	47		
17-ene	5	2,05	2,05	1-mar	48		
18-ene	6	2,07	2,07	2-mar	49		
19-ene	7	1,97	1,97	3-mar	50		
20-ene	8	2,02	2,02	6-mar			
23-ene	11	2,09	2,09	7-mar			
24-ene	12	2,07	2,07	8-mar			
25-ene	13	2,04	2,04	9-mar			
26-ene	14	2,01	2,01	10-mar			
27-ene	15	2,02	2,02	13-mar	60	2,00	2,00
30-ene	18	2,08	2,08	14-mar	61		
31-ene	19	1,99	1,99	15-mar	62		
1-feb	20	2,02	2,02	16-mar	63		
2-feb	21	1,98	1,98	17-mar	64		
3-feb	22	2,06	2,06	20-mar	67	2,00	2,00
6-feb	25	2,00	2,00	21-mar	68		
7-feb	26			22-mar	69		
8-feb	27	2,04	2,04	23-mar	70		
9-feb	28			24-mar	71		
10-feb	29			27-mar	74		
13-feb	32			28-mar	75		
14-feb	33			29-mar	76		
15-feb	34			30-mar	77	1,89	1,95
16-feb	35	2,04	2,04	31-mar	78		
17-feb	36			3-abr	81		
20-feb	39			4-abr	82		
21-feb	40			5-abr	83		
22-feb	41			6-abr	84	1,98	1,98
23-feb	42			7-abr	85	2,26	
24-feb	43						

Muestra Código: B1				pH: 2		CICLO CONTINUO	
Fecha	Día	pH		Fecha	Día	pH	
		Inicial	Final			Inicial	Final
13-ene	1	2,07	2,07	6-mar	53	2,32	2,32
16-ene	3	4,12	2,07	7-mar	54	2,39	2,39
17-ene	4	2,28	2,28	8-mar	55	2,43	1,99
18-ene	5	2,48	2,48	9-mar	56		
19-ene	6	2,61	2,03	10-mar	57		
20-ene	7	2,23	2,23	13-mar	60	2,16	2,16
23-ene	11	2,53	2,00	14-mar	61	2,19	2,19
24-ene	12	2,13	2,13	15-mar	62	2,21	2,21
25-ene	13	2,21	2,21	16-mar	63	2,3	2,30
26-ene	14	2,28	2,28	17-mar	64	2,25	2,25
27-ene	15	2,3	2,30	20-mar	67	2,39	2,39
30-ene	18	2,55	2,02	21-mar	68	2,43	2,43
31-ene	19	2,07	2,07	22-mar	69	2,53	2,00
1-feb	20	2,17	2,17	23-mar	70	2	2,00
2-feb	21	2,17	2,17	24-mar	71		
3-feb	22	2,25	2,00	27-mar	74	2,07	2,07
6-feb	25	2,24	2,24	28-mar	75	2,15	2,15
7-feb	26			29-mar	76	2,2	2,20
8-feb	27	2,39	2,39	30-mar	77	2,18	2,18
9-feb	28	2,43	2,43	31-mar	78	2,26	2,26
10-feb	29	2,5	1,99	3-abr	81	2,32	2,32
13-feb	32	2,21	2,21	4-abr	82	2,37	2,37
14-feb	33			5-abr	83	2,39	2,39
15-feb	34	2,25	2,25	6-abr	84	2,42	2,42
16-feb	35	2,35	2,35	7-abr	85	2,53	
17-feb	36	2,38	2,38				
20-feb	39	2,54	2,03				
21-feb	40	2,04	2,04				
22-feb	41	2,09	2,09				
23-feb	42	2,11	2,11				
24-feb	43						
27-feb	46	2,25	2,05				
28-feb	47	2,27	2,00				
1-mar	48	2,13	2,13				
2-mar	49	2,15	2,15				
3-mar	50	2,26	2,27				

Muestra Código: C02, C03, C04 pH: 2 CICLO CONTINUO							
Fecha	Día	pH		Fecha	Día	pH	
		Inicial	Final			Inicial	Final
13-ene	1	2,09	2,09	6-mar	53	2,91	2,02
16-ene	4	12,05	1,94	7-mar	54	2,31	2,31
17-ene	5	5,21	2,04	8-mar	55	2,75	1,96
18-ene	6	5,48	2,08	9-mar	56		
19-ene	7	5,08	2,07	10-mar	57		
20-ene	8	4,45	2,06	13-mar	60	3,20	2,03
23-ene	11	6,37	2,02	14-mar	61	2,34	2,34
24-ene	12	3,19	2,04	15-mar	62	2,67	2,01
25-ene	13	3,30	2,02	16-mar	63	2,27	2,27
26-ene	14	3,17	2,05	17-mar	64	2,60	1,97
27-ene	15	3,2	2,03	20-mar	67	2,80	2,03
30-ene	18	4,48	1,97	21-mar	68	2,33	2,33
31-ene	19	2,80	2,00	22-mar	69	2,60	2,01
1-feb	20	2,64	1,99	23-mar	70	2,33	2,33
2-feb	21	2,72	2,00	24-mar	71		
3-feb	22	2,67	1,99	27-mar	74	3,18	2,03
6-feb	25	3,48	1,95	28-mar	75	2,41	2,41
7-feb	26			29-mar	76	2,74	2,03
8-feb	27	3,09	1,95	30-mar	77	2,22	2,22
9-feb	28	2,45	1,98	31-mar	78	2,57	2,03
10-feb	29	2,40	1,98	3-abr	81	2,87	2,04
13-feb	32	3,29	1,91	4-abr	82	2,38	2,38
14-feb	33			5-abr	83	2,74	2,05
15-feb	34	2,65	2,03	6-abr	84	2,39	2,39
16-feb	35	2,49	2,01	7-abr	85	2,67	
17-feb	36	2,46	2,00				
20-feb	39	3,63	2,00				
21-feb	40	2,32	2,32				
22-feb	41	2,61	2,04				
23-feb	42	2,38	2,38				
24-feb	43	2,69	1,97				
27-feb	46	2,50	2,00				
28-feb	47	2,36					
1-mar	48	2,92	1,95				
2-mar	49	2,32	2,32				
3-mar	50	2,66	1,99				

Muestra Código: A2				pH: 4		CICLO CONTINUO		
Fecha	Día	pH		Fecha	Día	pH		
		Inicial	Final			Inicial	Final	
13-ene	1	4,03	4,03	3-mar	50			
16-ene	3	4,96	4,09	6-mar				
17-ene	4	4,16	4,16	7-mar				
18-ene	5	4,21	4,21	8-mar				
19-ene	6	4,22	4,22	9-mar				
20-ene	7	4,27	4,27	10-mar				
23-ene	11	4,35	4,35	13-mar	60	4,43	3,99	
24-ene	12	4,31	4,31	14-mar	61			
25-ene	13	4,32	4,32	15-mar	62			
26-ene	14	4,32	4,32	16-mar	63			
27-ene	15	4,35	4,35	17-mar	64			
30-ene	18	4,41	4,41	20-mar	67	4,05	4,05	
31-ene	19	4,42	4,42	21-mar	68			
1-feb	20	4,44	4,44	22-mar	69			
2-feb	21	4,42	4,42	23-mar	70			
3-feb	22	4,47	3,98	24-mar	71			
6-feb	25	4,13	4,13	27-mar	74			
7-feb	26			28-mar	75			
8-feb	27	4,1	4,1	29-mar	76			
9-feb	28			30-mar	77	4,11	4,11	
10-feb	29			31-mar	78			
13-feb	32	4,22	4,22	3-abr	81			
14-feb	33			4-abr	82			
15-feb	34	4,37	4,37	5-abr	83			
16-feb	35			6-abr	84	4,12	4,12	
17-feb	36			7-abr	85	4,2		
20-feb	39							
21-feb	40							
22-feb	41	4,32	4,32					
23-feb	42							
24-feb	43	4,32	4,32					
27-feb	46	4,31	4,31					
28-feb	47							
1-mar	48							
2-mar	49							

Muestra Código: B2				pH: 4		CICLO CONTINUO	
Fecha	Día	pH		Fecha	Día	pH	
		Inicial	Final			Inicial	Final
13-ene	1	4,03	4,03	6-mar	53	5,66	4,02
16-ene	3	7,08	3,9	7-mar	54	4,55	4,01
17-ene	4	5,53	4,02	8-mar	55	4,73	3,97
18-ene	5	5,72	4,01	13-mar	60	5,95	4
19-ene	6	5,47	4,05	14-mar	61	4,7	4,05
20-ene	7	5,47	4,03	15-mar	62	4,71	4,03
23-ene	11	6,67	4,05	16-mar	63	4,69	4
24-ene	12	4,83	3,96	17-mar	64	4,7	4,03
25-ene	13	5,07	3,97	20-mar	67	5,33	3,96
26-ene	14	4,73	4,01	21-mar	68	4,05	4,05
27-ene	15	4,7	4,02	22-mar	69	4,59	4,03
30-ene	18	6,51	4,01	23-mar	70	4,64	3,96
31-ene	19	4,89	3,99	27-mar	74	5,81	4,03
1-feb	20	4,68	4,05	28-mar	75	4,61	4,05
2-feb	21	4,86	4,02	29-mar	76	4,76	4,02
3-feb	22	4,78	4	30-mar	77	4,52	4,03
6-feb	25	6,41	4,05	31-mar	78	4,63	4,05
8-feb	27	5,45	4,01	3-abr	81	5,17	4,04
9-feb	28	4,68	4,04	4-abr	82	4,56	4,03
10-feb	29	4,56	4,03	5-abr	83	4,65	3,95
13-feb	32	5,84	4	6-abr	84	4,47	4,44
15-feb	34	5,58	4	7-abr	85	4,89	-
16-feb	35	4,59	4,04				
17-feb	36	4,67	4				
20-feb	39	5,9	4,03				
21-feb	40	4,59	4,01				
22-feb	41	4,68	4,05				
23-feb	42	4,67	3,95				
24-feb	43	4,58	4,01				
27-feb	46	5,49	4,01				
28-feb	47	4,73	3,96				
1-mar	48	4,57	3,99				
2-mar	49	4,59	3,97				
3-mar	50	4,51	3,99				

Muestra Código: C05, C06, C07				pH: 4		CICLO CONTINUO	
Fecha	Día	pH		Fecha	Día	pH	
		Inicial	Final			Inicial	Final
13-ene	1	3,99	3,99	6-mar	53	11,43	4,01
16-ene	3	12,21	3,95	7-mar	54	11,06	4,05
17-ene	4	11,83	4,07	8-mar	55	11,02	3,95
18-ene	5	11,77	4,09	13-mar	60	11,58	4,04
19-ene	6	11,59	4,08	14-mar	61	11,12	4,03
20-ene	7	11,61	3,97	15-mar	62	10,98	4,05
23-ene	11	12,05	4,03	16-mar	63	10,98	4,06
24-ene	12	11,54	4,03	17-mar	64	10,99	4,02
25-ene	13	11,53	4,01	20-mar	67	11,5	3,98
26-ene	14	11,41	3,96	21-mar	68	11,13	4,04
27-ene	15	11,5	4,01	22-mar	69	11,1	4,05
30-ene	18	12,01	3,99	23-mar	70	11,18	4,05
31-ene	19	11,57	3,98	27-mar	74	11,67	4,03
1-feb	20	11,35	4,01	28-mar	75	11,23	3,99
2-feb	21	11,4	4,01	29-mar	76	11,13	4,04
3-feb	22	11,34	4,03	30-mar	77	10,83	4,01
6-feb	25	11,87	3,95	31-mar	78	10,94	4,05
8-feb	27	11,7	4	3-abr	81	11,1	4,02
9-feb	28	11,44	3,98	4-abr	82	11,04	3,99
10-feb	29	11,3	4	5-abr	83	10,8	4,04
13-feb	32	11,75	4	6-abr	84	10,86	4,04
15-feb	34	11,55	4	7-abr	85	10,79	-
16-feb	35	11,36	4,02				
17-feb	36	11,33	4,04				
20-feb	39	11,68	4,05				
21-feb	40	11,75	3,99				
22-feb	41	11,17	4				
23-feb	42	11,07	4,01				
24-feb	43	11,07	4,02				
27-feb	46	11,57	4,04				
28-feb	47	11,16	3,97				
1-mar	48	11,06	3,99				
2-mar	49	11,04	4,09				
3-mar	50	11,04	4,01				

Anexo 3

Datos del control diario del valor de pH en el ensayo de Ciclo Alternado (muestras con código: A3, A4, A5, B3, B4, B5, C08-C09-C10, C11-C12-C14, C14-C15-C16).

Muestra Código: A3				pH: 2		CICLO ALTERNADO	
Fecha	Día	pH		Fecha	Día	pH	
		Inicial	Final			Inicial	Final
13-ene	1	2,05	2,05	27-feb	46	2,01	2,01
16-ene	3	2,68	2,04	28-feb	47		2,01
17-ene	4	2,04	2,04	1-mar	48		
18-ene	5	2,05	2,05	2-mar	49		
19-ene	6	1,97	1,97	3-mar	50		
20-ene	7	2,07	2,07	6-mar	53		
23-ene	11	2,12		7-mar	54		
24-ene	12		1,99	8-mar	55		
25-ene	13	2,06	2,06	9-mar	56		
26-ene	14	1,97	1,97	10-mar	57		
27-ene	15	2,00	2,00	13-mar	60	1,97	1,97
30-ene	18	2,03	2,03	14-mar	61		
31-ene	19	1,98	1,98	15-mar	62		
1-feb	20	2,00	2,00	16-mar	63		
2-feb	21	1,94	1,94	17-mar	64		
3-feb	22	2	2	20-mar	67	1,94	
6-feb	25	1,99		21-mar	68	1,94	
7-feb	26		1,99	22-mar	69		
8-feb	27	2,08	2,08	23-mar	70		
9-feb	28			24-mar	71		
10-feb	29			27-mar	74		
13-feb	29			28-mar	75		
14-feb	30			29-mar	76		
15-feb	31			30-mar	77	1,87	1,95
16-feb	32			31-mar	78		
17-feb	33			3-abr	81		
20-feb	39			4-abr	82		
21-feb	40	2,06	2,06	5-abr	83		
22-feb	41			6-abr	84	1,99	1,99
23-feb	42			7-abr	85	2,2	

Muestra Código: B3		pH: 2		CICLO ALTERNADO			
Fecha	Día	pH		Fecha	Día	pH	
		Inicial	Final			Inicial	Final
13-ene	1	2,03	2,03	1-mar	18	2,11	2,11
16-ene	3	4,41	2,01	2-mar	49	2,15	2,15
17-ene	4	2,25	2,25	3-mar	50	2,2	2,2
18-ene	5	2,44	2,44	6-mar	53	2,23	2,23
19-ene	6	2,57	2,07	7-mar	54	2,28	2,28
20-ene	7	2,28	2,28	8-mar	55	2,33	1,99
23-ene	11	2,67		9-mar	56		
24-ene	12		2,07	10-mar	57		
25-ene	13	2,23	2,23	13-mar	60	2,1	2,1
26-ene	14	2,34	2,34	14-mar	61	2,14	2,14
27-ene	15	2,4	2,4	15-mar	62	2,18	2,18
30-ene	18	2,8	2,02	16-mar	63	2,21	2,21
31-ene	19	2,11	2,11	17-mar	64	2,21	2,21
1-feb	20	2,28	2,28	20-mar	67	2,31	
2-feb	21	2,28	2,28	21-mar	68		1,98
3-feb	22	2,39	2,39	22-mar	69	2,06	2,06
6-feb	25	2,71		23-mar	70	2,09	2,09
7-feb	26		1,98	24-mar	71		
8-feb	27	2,15	2,15	27-mar	74	2,13	2,13
9-feb	28	2,17	2,17	28-mar	75	2,24	2,24
10-feb	29	2,26	2,26	29-mar	76	2,22	2,22
13-feb	32	2,55	2,04	30-mar	77	2,22	2,22
14-feb	33			31-mar	78	2,3	2,3
15-feb	34	2,08	2,08	3-abr	81	2,33	2,33
16-feb	35	2,15	2,15	4-abr	82	2,39	2,39
17-feb	36	2,25	2,25	5-abr	83	2,38	2,38
20-feb	39	2,44	2	6-abr	84	2,4	2,4
21-feb	40	2,02	2,02	7-abr	85	2,49	
22-feb	41	2,12	2,12				
23-feb	42	2,12	2,12				
24-feb	43	2,19	2,19				
27-feb	46	2,3					
28-feb	47		2,00				

Muestra Código: C08, C09, C10				pH: 2		CICLO ALTERNADO	
Fecha	Día	pH		Fecha	Día	pH	
		Inicial	Final			Inicial	Final
13-ene	1	2,05	2,05	6-mar	53	11,21	1,98
16-ene	3	12,09	1,99	7-mar	54	10,35	2,04
17-ene	4	4,6	2,05	8-mar	55	10,84	1,93
18-ene	5	5,58	2,04	9-mar	56		
19-ene	6	4,92	2,06	10-mar	57		
20-ene	7	4,46	2,04	13-mar	60	11,97	2
23-ene	11	6,22		14-mar	61	10,45	1,98
24-ene	12		2,03	15-mar	62	5,28	2
25-ene	13	3,3	2,01	16-mar	63	9,19	2,01
26-ene	14	3,54	2,04	17-mar	64	8,58	2
27-ene	15	4,00	2,02	20-mar	67	11,72	
30-ene	18	5,98	2,03	21-mar	68		
31-ene	19	3,48	2,02	22-mar	69	FIN DEL ENSAYO	
1-feb	20	2,99	1,97				
2-feb	21	2,9	2,02				
3-feb	22	2,89	2,01				
6-feb	25	3,75					
7-feb	26		2,00				
8-feb	27	2,82	1,98				
9-feb	28	2,95	1,98				
10-feb	29	2,83	2				
13-feb	32	3,77	1,98				
14-feb	33						
15-feb	34	3,25	1,97				
16-feb	35	2,71	2,03				
17-feb	36	2,78	2,01				
20-feb	39	3,33	1,99				
21-feb	40	2,43	2,02				
22-feb	41	2,53	1,94				
23-feb	42	2,46	2				
24-feb	43	2,5	1,96				
27-feb	46	3,26					
28-feb	47		1,96				
1-mar	48	3,97	1,99				
2-mar	49	9,05	2,00				
3-mar	50	9,54	1,99				

Muestra Código: A4				pH: 4		CICLO ALTERNADO	
Fecha	Día	pH		Fecha	Día	pH	
		Inicial	Final			Inicial	Final
13-ene	1	4,04	4,04	1-mar	48		
16-ene	3	4,54	4,08	2-mar	49		
17-ene	4	4,56	4,06	3-mar	50		
18-ene	5	4,11	4,11	6-mar			
19-ene	6	4,1	4,1	7-mar			
20-ene	7	4,21	4,21	8-mar			
23-ene	11	4,15		9-mar			
24-ene	12		3,96	10-mar			
25-ene	13	3,98	3,98	13-mar	60	4,18	4,18
26-ene	14	3,97	3,97	14-mar	61		
27-ene	15	4	4	15-mar	62		
30-ene	18	4,02	4,02	16-mar	63		
31-ene	19	3,99	3,99	17-mar	64		
1-feb	20	4,02	4,02	20-mar	67	4,35	
2-feb	21	3,77	3,77	21-mar	68		4,03
3-feb	22	4,02	4,02	22-mar	69		
6-feb	25	4,15		23-mar	70		
7-feb	26		4,03	24-mar	71		
8-feb	27	4,06	4,06	27-mar	74		
9-feb	28			28-mar	75		
10-feb	29			29-mar	76		
13-feb	32	4,13	4,13	30-mar	77	4,15	4,15
14-feb	33			31-mar	78		
15-feb	34	4,18	4,18	3-abr	81		
16-feb	35			4-abr	82		
17-feb	36			5-abr	83		
20-feb	39			6-abr	84	4,14	4,14
21-feb	40			7-abr	85	4,22	-
22-feb	41	4,17	4,17				
23-feb	42						
24-feb	43						
27-feb	46	4,16	4,16				
28-feb	47		4,16				

Muestra Código: B4 pH: 4 CICLO ALTERNADO							
Fecha	Día	pH		Fecha	Día	pH	
		Inicial	Final			Inicial	Final
13-ene	1	4,15	4,15	2-mar	49	4,58	4,02
16-ene	4	6,94	4,15	3-mar	50	4,57	3,98
17-ene	5	6,12	4,06	6-mar	53	5,75	3,95
18-ene	6	5,62	4,04	7-mar	54	4,55	3,95
19-ene	7	5,3	3,99	8-mar	55	4,03	3,95
20-ene	8	5,14	4	9-mar	56		
23-ene	11	6,45		10-mar	57		
24-ene	12		3,99	13-mar	60	5,9	3,96
25-ene	13	5,63	4,02	14-mar	61	4,78	4,04
26-ene	14	5,35	3,96	15-mar	62	4,75	3,99
27-ene	15	5,4	4,01	16-mar	63	4,69	4,03
30-ene	18	6,66	3,95	17-mar	64	4,8	4
31-ene	19	5	3,97	20-mar	67	5,29	
1-feb	20	4,9	4,02	21-mar	68		3,98
2-feb	21	4,91	4,03	22-mar	69	4,6	4,02
3-feb	22	4,86	4	23-mar	70	4,62	4,01
6-feb	25	6,19		24-mar	71		
7-feb	26		4,00	27-mar	74	5,75	3,95
8-feb	27	4,72	4	28-mar	75	4,53	4,04
9-feb	28	4,66	4,04	29-mar	76	4,77	4,05
10-feb	29	4,51	4,04	30-mar	77	4,55	4,03
13-feb	32	5,89	3,99	31-mar	78	4,44	4,44
14-feb	33			3-abr	81	5,68	4,02
15-feb	34	5,53	3,95	4-abr	82	4,83	4,02
16-feb	35	4,55	4,03	5-abr	83	4,74	4
17-feb	36	4,68	3,96	6-abr	84	4,59	4,01
20-feb	39	5,78	3,96	7-abr	85	4,44	-
21-feb	40	4,47	4,47				
22-feb	41	5,22	4,08				
23-feb	42	4,53	4,07				
24-feb	43	4,74	4,04				
27-feb	46	5,6					
28-feb	47		3,96				
1-mar	48	4,63	4				

Muestra Código: C11, C12, C13 pH: 4 CICLO							
ALTERNADO							
Fecha	Día	pH		Fecha	Día	pH	
		Inicial	Final			Inicial	Final
13-ene	1	4,09	4,09	2-mar	49	11,02	4
16-ene	3	12,05	4,07	3-mar	50	11,11	4,04
17-ene	4	11,7	3,96	6-mar	53	11,62	3,97
18-ene	5	11,73	3,96	7-mar	54	11,17	4,05
19-ene	6	11,64	4,03	8-mar	55	11,22	3,97
20-ene	7	11,65	4,07	9-mar	56		
23-ene	11	11,98		10-mar	57		
24-ene	12		3,99	13-mar	60	11,7	3,96
25-ene	13	11,2	3,95	14-mar	61	11,1	4,04
26-ene	14	11,23	4	15-mar	62	10,98	4,01
27-ene	15	11,24	4	16-mar	63	11,05	4,01
30-ene	18	11,76	4,06	17-mar	64	11,04	4
31-ene	19	11,47	4	20-mar	67	11,41	
1-feb	20	11,26	3,97	21-mar	68		4,01
2-feb	21	11,34	4,05	22-mar	69	9,75	4,03
3-feb	22	11,23	4,03	23-mar	70	10,58	3,97
6-feb	25	11,95		24-mar	71		
7-feb	26		4,03	27-mar	74		4,03
8-feb	27	10,59	4,02	28-mar	75	11,38	3,98
9-feb	28	11,08	3,99	29-mar	76	11,31	3,98
10-feb	29	11,2	4,05	30-mar	77	10,96	4,04
13-feb	32	11,82	4,01	31-mar	78	10,94	4,02
14-feb	33			3-abr	81	11,71	3,95
15-feb	34	11,6	4,04	4-abr	82	11,32	4,02
16-feb	35	11,31	4,02	5-abr	83	11,28	4,04
17-feb	36	11,21	4,01	6-abr	84	11,19	3,96
20-feb	39	11,81	4,02	7-abr	85	10,9	-
21-feb	40	11,4	3,99				
22-feb	41	11,26	3,98				
23-feb	42	11,04	4				
24-feb	43	11,17	4,01				
27-feb	46	11,66					
28-feb	47		3,98				
1-mar	48	10,32	3,98				

Muestra Código: A5 pH: 5,5 CICLO ALTERNADO							
Fecha	Día	pH		Fecha	Día	pH	
		Inicial	Final			Inicial	Final
13-ene	1	5,46	5,46	3-mar	50	5,85	5,85
16-ene	3	6,59	5,56	6-mar			
17-ene	4	6	5,51	7-mar			
18-ene	5	5,88	5,88	8-mar			
19-ene	6	6,36	5,47	9-mar			
20-ene	7	5,84	5,84	10-mar			
23-ene	11	6,53		13-mar	60	6,18	5,48
24-ene	12		5,48	14-mar	61		
25-ene	13	5,87	5,87	15-mar	62		
26-ene	14	6,1	5,47	16-mar	63		
27-ene	15	6,12	5,49	17-mar	64		
30-ene	18	6,37	5,53	20-mar	67	6,45	
31-ene	19	5,76	5,76	21-mar	68		5,52
1-feb	20	6,13	5,53	22-mar	69	6,06	5,52
2-feb	21	5,85	5,85	23-mar	70		
3-feb	22	6,01	5,48	24-mar	71		
6-feb	25	6,35		27-mar	74		
7-feb	26		5,53	28-mar	75		
8-feb	27	6,14	5,52	29-mar	76		
9-feb	28	4,01	5,55	30-mar	77		
10-feb	29	5,72	5,72	31-mar	78		
13-feb	32	6,13	5,47	3-abr	81		
14-feb	33			4-abr	82		
15-feb	34	3,8	5,53	5-abr	83		
16-feb	35	5,78	5,78	6-abr	84	5,96	5,54
17-feb	36			7-abr	85	6	-
20-feb	39						
21-feb	40	6,11	5,5				
22-feb	41	5,62	5,62				
23-feb	42						
24-feb	43	5,97	5,52				
27-feb	46	6,00					
28-feb	47		5,5				
1-mar	48						
2-mar	49						

Muestra Código: B5				pH: 5,5		CICLO ALTERNADO	
Fecha	Día	pH		Fecha	Día	pH	
		Inicial	Final			Inicial	Final
13-ene	1	5,51	5,51	3-mar	50	6,16	5,52
16-ene	3	8,29	5,53	6-mar	53	6,81	5,51
17-ene	4	6,57	5,57	7-mar	54	6,51	5,46
18-ene	5	6,63	5,57	8-mar	55	6,38	5,32
19-ene	6	6,49	5,5	9-mar	56		
20-ene	7	6,57	5,58	10-mar	57		
23-ene	11	7,41		13-mar	60	6,4	5,52
24-ene	12		5,58	14-mar	61	3,28	5,5
25-ene	13	6,74	5,54	15-mar	62	5,79	5,79
26-ene	14	6,49	5,48	16-mar	63	6,3	5,49
27-ene	15	6,5	5,49	17-mar	64	6,13	5,49
30-ene	18	7,18	5,55	20-mar	67	6,64	
31-ene	19	6,35	5,58	21-mar	68		5,51
1-feb	20	6,31	5,52	22-mar	69	6,38	5,54
2-feb	21	6,24	5,42	23-mar	70	6,23	5,52
3-feb	22	6,22	5,51	24-mar	71		
6-feb	25	6,91		27-mar	74	6,91	5,49
7-feb	26		5,44	28-mar	75	6,21	5,51
8-feb	27	6,56	5,51	29-mar	76	6,34	5,51
9-feb	28	6,43	5,5	30-mar	77	6,24	5,47
10-feb	29	6,33	5,5	31-mar	78	6,25	5,46
13-feb	32	7,02	5,47	3-abr	81	6,47	5,46
14-feb	33	-	-	4-abr	82	6,43	5,47
15-feb	34	6,57	5,52	5-abr	83	6,15	5,49
16-feb	35	6,52	5,47	6-abr	84	6,12	5,45
17-feb	36	6,4	5,47	7-abr	85	6,11	-
20-feb	39	7,01	5,48				
21-feb	40	6,35	5,47				
22-feb	41	6,22	5,45				
23-feb	42	6,14	5,47				
24-feb	43	6,18	5,49				
27-feb	46	6,26					
28-feb	47		5,52				
1-mar	48	6,53	5,51				
2-mar	49	6,27	5,49				

Muestra Código: C14,C15,C16 pH: 5,5 CICLO							
ALTERNADO							
Fecha	Día	pH		Fecha	Día	pH	
		Inicial	Final			Inicial	Final
13-ene	1	5,51	5,51	2-mar	49	10,74	5,49
16-ene	3	12,05	5,45	3-mar	50	10,82	5,52
17-ene	4	11,72	5,45	6-mar	53	11,39	5,48
18-ene	5	11,6	5,57	7-mar	54	11	5,57
19-ene	6	11,39	5,58	8-mar	55	10,98	5,33
20-ene	7	11,47	5,48	9-mar	56		
23-ene	11	12,03		10-mar	57		
24-ene	12	-	5,54	13-mar	60	11,34	5,53
25-ene	13	11,13	5,47	14-mar	61	11,04	5,55
26-ene	14	11,36	5,56	15-mar	62	10,93	5,56
27-ene	15	11,4	5,56	16-mar	63	11,31	5,51
30-ene	18	11,82	5,46	17-mar	64	11,12	5,51
31-ene	19	11,5	5,57	20-mar	67	11,03	
1-feb	20	11,29	5,53	21-mar	68		5,5
2-feb	21	11,29	5,44	22-mar	69	9,64	5,5
3-feb	22	11,14	5,55	23-mar	70	10,29	5,49
6-feb	25	11,83		24-mar	71		
7-feb	26		5,52	27-mar	74	11,55	5,51
8-feb	27	10,53	5,57	28-mar	75	11,15	5,52
9-feb	28	11,08	5,53	29-mar	76		5,52
10-feb	29	11,16	5,57	30-mar	77	10,96	5,52
13-feb	32	11,68	5,55	31-mar	78	11,25	5,49
14-feb	33			3-abr	81	11,59	5,54
15-feb	34	11,35	5,48	4-abr	82	11,14	5,53
16-feb	35	11,3	5,49	5-abr	83	11,24	5,48
17-feb	36	11,27	5,57	6-abr	84	11,08	5,5
20-feb	39	11,75	5,56	7-abr	85	10,96	-
21-feb	40	11,21	5,5				
22-feb	41	11,21	5,5				
23-feb	42	11,13	5,45				
24-feb	43	11,05	5,51				
27-feb	46	11,42					
28-feb	47		5,46				
1-mar	48	10,1	5,51				

Anexo 4

Mediciones de masa en seco de las muestras utilizadas en el laboratorio en el Ciclo Continuo y el Ciclo Alternado

		Inicial	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5
pH	Cod.	Masa (g)	Masa (g)	Masa (g)	Masa (g)	Masa (g)	Masa (g)
Concreto Lanzado							
2	C02	270,704					265,935
2	C03	271,170					265,042
2	C04	275,350					268,844
4	C05	267,766					263,849
4	C06	274,572					270,566
4	C07	266,590					262,583
2	C08	260,891	253,283	249,297	236,705	163,204	-
2	C09	266,282	268,335	255,978	252,276	158,140	-
2	C10	274,789	259,244	265,525	255,465	120,697	-
4	C11	273,275	268,194	268,204	268,499	268,598	267,789
4	C12	274,908	269,873	269,984	270,141	270,139	270,641
4	C13	267,741	262,672	262,759	262,976	263,606	264,153
5,5	C14	268,612	263,822	264,012	264,078	264,501	264,925
5,5	C15	269,315	264,286	264,400	264,478	264,898	265,249
5,5	C16	271,770	266,798	266,818	266,928	267,452	267,430
Brecha volcánica							
2	B1	337,764					308,205
4	B2	336,453					310,336
2	B3	332,139	308,985	306,033	303,854	303,988	304,988
4	B4	332,199	305,690	303,874	303,432	303,666	304,251
5,5	B5	351,603	332,300	330,604	330,228	330,128	330,265
Andesita							
2	A1	314,584					314,175
4	A2	355,659					355,334
2	A3	339,446	339,067	339,022	338,992	338,984	338,974
4	A4	332,926	332,645	332,621	332,601	332,608	332,621
5,5	A5	322,717	322,433	322,42	322,402	322,41	322,414

Anexo 5

Mediciones de las dimensiones de las muestras utilizadas en laboratorio en el Ciclo Continuo y el Ciclo Alternado

Ciclo	Inicial		Ciclo 1		Ciclo 2		Ciclo 3		Ciclo 4		Ciclo 5 (final)	
Código	Diam.	Long.	Diam.	Long.	Diam.	Long.	Diam.	Long.	Diam.	Long.	Diam.	Long.
	Prom	Prom	Prom	Prom	Prom	Prom	Prom	Prom	Prom	Prom	Prom	Prom
C02	44,56	89,62									44,60	91,12
C03	44,50	89,97									45,20	91,06
C04	44,48	89,69									45,39	90,82
C05	44,51	89,03									44,55	89,12
C06	44,49	89,58									44,58	89,69
C07	44,51	89,47									44,53	88,17
C08	44,43	89,38	44,37	89,27	44,35	89,06	44,09	91,49	42,21	86,35	0,00	0,00
C09	44,55	89,28	44,46	88,65	44,59	89,15	39,59	92,49	41,26	76,45	0,00	0,00
C10	44,47	89,84	44,49	89,29	44,61	89,47	43,18	92,86	38,34	73,86	0,00	0,00
C11	44,52	89,53	44,50	89,60	44,62	89,59	44,62	89,58	45,11	90,26	45,21	91,24
C12	44,68	89,88	44,49	89,68	44,55	89,75	44,56	89,91	44,77	90,26	45,26	91,04
C13	44,53	89,68	44,48	89,44	44,47	89,41	44,58	89,60	44,78	90,50	45,11	91,08
C14	44,57	89,00	44,50	88,93	44,52	88,99	44,55	89,19	44,73	89,26	44,93	89,66
C15	44,45	89,06	44,51	89,40	44,35	89,24	44,43	89,37	44,65	89,61	44,80	89,96
C16	44,60	89,82	44,53	89,40	44,50	89,45	44,62	89,56	44,74	89,83	45,13	90,52
A1	38,66	88,27									38,59	88,17
A2	40,51	88,75									38,89	88,80
A3	40,89	88,02	40,97	87,87	40,84	88,80	40,84	87,85	40,88	87,94	40,80	87,98
A4	42,09	88,63	42,14	88,29	42,23	88,43	42,15	88,72	42,42	88,21	42,13	88,44
A5	37,86	89,52	37,67	89,13	37,77	89,19	37,80	89,22	37,75	89,23	37,64	89,13
B1	44,54	91,19									44,45	91,00
B2	44,51	93,40									44,41	92,95
B3	44,52	89,80	44,42	89,76	44,57	89,98	44,51	89,88	44,50	89,98	44,55	89,75
B4	44,54	91,47	44,32	91,35	44,44	91,75	44,42	91,51	44,45	91,39	44,28	91,46
B5	44,57	90,90	44,55	91,06	44,59	91,20	44,53	91,18	44,50	90,82	44,53	90,88

Anexo 6

Volumen inicial de las muestras utilizadas en el laboratorio

Muestra	Peso seco (g)	Peso sumergido (g)	Temp. Agua °C	Densidad Agua (g/cm ³)	Dif. Masas (seco - sumergido)	Volumen (cm ³)	Densidad de la muestra (g/cm ³)
C02	270,704	135,5	22	0,9978	135,204	135,50	2,00
C03	271,17	137,2	22	0,9978	133,970	134,27	2,02
C04	275,35	139,7	22	0,9978	135,650	135,95	2,03
C05	267,766	135,2	22	0,9978	132,566	132,86	2,02
C06	274,572	140,6	22	0,9978	133,972	134,27	2,04
C07	266,59	132,8	22	0,9978	133,790	134,08	1,99
C08	260,891	128,1	22	0,9978	132,791	133,08	1,96
C09	266,282	135,1	22	0,9978	131,182	131,47	2,03
C10	274,789	142,2	22	0,9978	132,589	132,88	2,07
C11	273,275	140,1	22	0,9978	133,175	133,47	2,05
C12	274,908	141,9	22	0,9978	133,008	133,30	2,06
C13	267,741	133,2	22	0,9978	134,541	134,84	1,99
C14	268,612	135,1	22	0,9978	133,512	133,81	2,01
C15	269,315	135,2	22	0,9978	134,115	134,41	2,00
C16	271,77	136,6	22	0,9978	135,170	135,47	2,01
B1	337,764	198,4	22	0,9978	139,364	139,67	2,42
B2	336,453	193,3	22	0,9978	143,153	143,47	2,35
B3	332,139	193,6	22	0,9978	138,539	138,84	2,39
B4	332,199	191,3	22	0,9978	140,899	141,21	2,35
B5	351,603	210,7	22	0,9978	140,903	141,21	2,49
A1	314,584	187,3	22	0,9978	127,284	127,56	2,47
A2	355,659	215,7	22	0,9978	139,959	140,27	2,54
A3	339,446	206	22	0,9978	133,446	133,74	2,54
A4	332,926	196	22	0,9978	136,926	137,23	2,43
A5	322,717	190	22	0,9978	132,717	133,01	2,43

Anexo 7

Volumen final de las muestras utilizadas en el laboratorio

Muestra	Peso seco (g) 18/04	Peso sumergido (g) 26/04	Temp. Agua °C	Densidad Agua (g/cm ³)	Dif. Masas (seco - sumergido)	Volumen (cm ³)	Densidad de la muestra (g/cm ³)
C02	265,935	138	24	0,9938	127,935	128,73	2,07
C03	265,042	142	24	0,9938	123,042	123,81	2,14
C04	268,844	138	24	0,9938	130,844	131,66	2,04
C05	263,849	135,5	24	0,9938	128,349	129,15	2,04
C06	270,566	143	24	0,9938	127,566	128,36	2,11
C07	262,583	132	24	0,9938	130,583	131,40	2,00
C08			24	0,9938	0,000	0,00	
C09			24	0,9938	0,000	0,00	
C10			24	0,9938	0,000	0,00	
C11	267,789	136	24	0,9938	131,789	132,61	2,02
C12	270,641	134	24	0,9938	136,641	137,49	1,97
C13	264,153	134	24	0,9938	130,153	130,96	2,02
C14	264,925	134	24	0,9938	130,925	131,74	2,01
C15	265,249	135	24	0,9938	130,249	131,06	2,02
C16	267,430	135	24	0,9938	132,430	133,26	2,01
B1	308,205	180	24	0,9938	128,205	129,00	2,39
B2	310,336	176	24	0,9938	134,336	135,17	2,30
B3	304,988	175	24	0,9938	129,988	130,80	2,33
B4	304,251	173,3	24	0,9938	130,951	131,77	2,31
B5	330,265	197	24	0,9938	133,265	134,10	2,46
A1	314,175	184,8	24	0,9938	129,375	130,18	2,41
A2	355,334	212,5	24	0,9938	142,834	143,73	2,47
A3	338,974	200,5	24	0,9938	138,474	139,34	2,43
A4	332,621	192,5	24	0,9938	140,121	141,00	2,36
A5	322,414	187,7	24	0,9938	134,714	135,55	2,38

Anexo 8

Mediciones iniciales de la masa y dimensiones de muestras utilizadas en campo.

código de muestra	Mediciones Generales Muestras Sanas									km	Ubicación GPS	Prof. (cm)
	Masa (g)	Diámetro (mm)				Longitud (mm)						
		Med 1	Med 2	Med 3	Prom	Med 1	Med 2	Med 3	Prom			
R27-01-48	267,4	44,5	44,5	44,5	44,50	90,3	90,3	90,3	90,30	48+000	447391 E / 1096782 N.	5
R27-02-48	267,7	44,41	44,5	44,5	44,47	89,75	89,75	89,75	89,75	48+000	447 399 E / 1096777 N	6
R27-03-48	267,8	44,52	44,5	44,5	44,51	90,35	90,35	90,35	90,35	48+000	447 410 E / 1096775 N	7
R27-04-48	268,5	44,5	44,6	44,7	44,60	90,26	90,19	90,17	90,21	48+000	447 384 E / 1096764 N.	4
R27-05-48	268,3	44,5	44,68	44,54	44,57	89,2	89,37	89,31	89,29	48+000	447 393 E / 1096758 N	5
R27-06-48	268,4	44,47	44,6	44,63	44,57	90,5	90,5	90,3	90,43	48+000	447 403 E / 1096757 N	5
R27-01-45	268,8	44,45	44,45	44,46	44,45	90,24	90,41	90,03	90,23	47+00	448 193 E / 1096760 N.	3
R27-02-45	269,8	44,43	44,58	44,46	44,49	89,93	90	90,06	90,00	47+00	448 212 E / 1096761N.	3
R27-03-45	267,2	44,51	44,57	44,57	44,55	89,93	90,43	89,94	90,10	47+00	448 225 E / 1096770 N.	6
R27-04-45	270	44,43	44,55	44,5	44,49	90,24	90,1	90,36	90,23	47+00	448 238 E / 1096765 N.	5
R27-01-38	269,1	44,47	44,66	44,42	44,52	90,3	90,42	90,2	90,31	38+600	455392 E / 1098658 N	3
R27-02-38	267,7	44,46	44,47	44,48	44,47	89,45	89,92	89,3	89,56	38+600	455393 E / 1098658 N	3
R27-03-38	270,6	44,54	44,53	44,47	44,51	90,27	90,25	90,06	90,19	38+600	455 386 E / 1098653 N	3
R27-04-38	272,7	44,48	44,69	44,52	44,56	90,35	90,27	90,28	90,30	38+600	455283 E / 1098573N.	7
R27-05-38	264,8	44,56	44,51	44,48	44,52	89,12	89,22	89,51	89,28	38+600	455271 E / 1099571 N	5
R27-06-38	266,3	44,45	44,46	44,47	44,46	90,85	90,68	90,56	90,70	38+600	455 267 E / 1098574 N	7

Anexo 9

Mediciones finales de la masa y dimensiones de muestras utilizadas en campo.

código de muestra	Mediciones Generales Muestras Sanas									km
	Masa (g)	Diámetro (mm)				Longitud				
		Med 1	Med 2	Med 3	Prom	Med 1	Med 2	Med 3	Prom	
R27-01-48	277,70 2	46,35	46,28	46,01	46,21	93,75	93,51	93,69	93,65	48+000
R27-04-48	255,08 2	44,66	44,94	43,57	44,39	92,09	92,26	92,25	92,20	48+000
R27-05-48	276,69 1	45,87	45,74	45,28	45,63	92,39	92,04	92,33	92,25	48+000
R27-06-48	274,61 2	45,7	45,6	45,9	45,73	92,9	92,99	92,69	92,86	48+000
R27-02-45	272,81 8	44,65	44,52	44,38	44,52	90,76	90,77	91,03	90,85	47+00
R27-03-45	271,33		44,51	45,69	45,10		92,99	92,45	92,72	47+00
R27-04-45	259,05	44,79	44,67	44,59	44,68	90,72	90,16	90,59	90,49	47+00
R27-01-38	257,30 9	44,78	45,6	45,81	45,40	92,99	92,98	92,72	92,90	38+600
R27-02-38	267,15 5	46,25	45,3	44,61	45,39	92,56	90,11	92,33	91,67	38+600
R27-04-38	272,94 8	44,64	44,51	44,9	44,68	90,88	90,11	90,82	90,60	38+600
R27-05-38	263,09 9	44,64	44,56	44,76	44,65	89,53	89,46	89,3	89,43	38+600
R27-06-38	270,46	44,61	44,46	44,65	44,57	91,3	91,25	91,57	91,37	38+600

Anexo 10

Manual para la caracterización del efecto del drenaje ácido en las rocas y en el concreto lanzado en los taludes de la ruta nacional No. 27 (San José – Caldera).

Universidad de Costa Rica
Escuela Centroamericana de Geología

**Manual para la caracterización del efecto del drenaje
ácido en las rocas y en el concreto lanzado en los taludes
de la ruta nacional No. 27 (San José – Caldera).**

Realizado por: Geól. Carolina Suárez Matarrita

Agosto 2017

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Alcances	1
1.2 Objetivo General	2
1.3 Principios teóricos del método	2
1.4 Hipótesis	3
1.5 Personal que interviene	3
1.6 Definiciones y unidades	4
1.8 Seguridad y riesgos	4
1.9 Condiciones de almacenamiento seguro	5
1.10 Equipo de protección personal en el laboratorio	5
1.11 Equipo de protección personal en el campo	5
1.12 Algunos comentarios generales	5
2. EQUIPO Y MATERIALES DE LABORATORIO	6
2.1 Equipo	6
2.2 Materiales	6
2.3 Cristalería	7
2.4 Reactivos requeridos	7
2.5 Muestras	7
3. PREPARACIÓN DE MATERIAL	8
3.1 Procedimiento para el muestreo en el campo	8
3.2 Procedimiento muestreo de concreto tipo lanzado	9
3.3 Secado de las muestras	10
3.4 Medición de masa de las muestras	10
3.5 Medición de dimensiones de las muestras	10
3.6 Medición de volumen de las muestras	11
3.7 Descripción microscópica	11
3.7.1 Microcopia Óptica	12
3.7.2 Microestructural	12
3.8 Preparación de disoluciones y mezclas	13
3.8.1 Procedimiento para la preparación de disolución ácida	13
4. EJECUCIÓN	15
4.1 Preparación general de los ensayos en laboratorio de Ciclo Continuo y Ciclo Alternado	15
4.2 Ensayo Ciclo Alternado	16
4.3 Ensayo Ciclo Continuo	18
4.4 Ensayo In situ	19
4.5 Ensayo de núcleos expuestos directamente al flujo de DAR	20
4.5.1 Ensayo de Ducha ácida en campo	21
4.5.2 Ensayo de Ducha ácida en laboratorio	22
5. REFERENCIAS	24
6. ANEXOS	25

1. INTRODUCCIÓN

Drenaje Ácido de Rocas (DAR) hace referencia a la acidificación de las aguas naturales como consecuencia de la descomposición por oxidación de las rocas que contienen minerales metálicos ricos en azufre o sulfuros, al estar expuestos a los agentes naturales como el agua y el aire. Durante este proceso se libera azufre que se combina con el agua y el oxígeno para formar ácido sulfúrico, y este es incorporado al agua, disminuyendo su pH (USEPA, 1994; Grandia et al., 2009 & Dold, 2010).

Esta metodología permite determinar los cambios provocados por el efecto del DAR de manera cuantitativa, en las propiedades de la roca sana aflorante y en los materiales utilizados comúnmente en la estabilización de taludes, como el concreto lanzado, presentes en los taludes de la ruta nacional No. 27 (RN-27).

1.1 Alcances

- En los ensayos en campo, se trabaja específicamente en los taludes de los estacionamientos km 38+600, km 45+000, km 47+000 y km 48+000.
- La disolución acuosa utilizada es el ácido sulfúrico, por ser el tipo de ácido identificado en la zona que genera el DAR.
- Para los ensayos de laboratorio, se utilizaron los valores de pH $2\pm 0,5$, pH $4\pm 0,5$ y pH $5,5\pm 0,5$. Estos son valores representativos de las condiciones actuales en la RN-27 y el valor de pH 5,5 es similar al de la lluvia ácida.
- Se utilizaron dos tipos de rocas aflorantes en la RN-27, la brecha volcánica del estacionamiento km 39+000 y la andesita del estacionamiento km 48+000, Las muestras de concreto lanzado fueron diseñadas con las mismas especificaciones utilizadas en la RN-27.
- Las características físicas consideradas para el análisis de las muestras son la masa, las dimensiones y el volumen.

- Las características mineralógicas, se analizaron por medio de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (MEB) con el método de dispersión de rayos X (DRX). Se describen muestras en su condición inicial y final para observar las alteraciones ocurridas.

1.2 Objetivo General

Desarrollar una metodología para la medición del efecto que tiene el DAR en las rocas aflorantes de los taludes de la RN-27 y en el concreto tipo lanzado que se utiliza para la estabilización de los taludes de esa misma ruta, mediante pruebas en el laboratorio y pruebas in situ.

1.3 Principios teóricos del método

Según Kerkhoff (2007), con un drenaje levemente ácido de pH 6,5 se manifiestan algunos efectos en el concreto, como la desintegración lenta del cemento y la erosión de la superficie; esta degradación aumenta a medida que el pH disminuye. El deterioro del concreto también consiste en la formación de minerales como yeso y etringita, los cuales inciden en la disminución de la resistencia compresiva, en la pérdida de masa y en el aumento del volumen.

La exposición del concreto al DAR, causa que los componentes del cemento se rompan y que provoquen lixiviación, aumentando la porosidad y la permeabilidad. Si el DAR se profundiza por medio de las fracturas y poros de la estructura de concreto, ocurre la corrosión del acero reforzado lo que podría provocar fracturas y la caída del concreto, por el deterioro de su refuerzo (Vargas & Fernández, 2002; Kerkhoff, 2007).

Los minerales que reaccionan de manera más efectiva con el DAR, son aquellos que contienen carbonato de calcio; provocando la pérdida de este componente al entrar

en interacción con el ácido sulfúrico. Esta reacción produce sulfato de calcio (yeso), agua y dióxido de carbono (Ruiz, et al. 2015).

Con los insumos bibliográficos sobre pruebas con DAR en diferentes tipos de concretos, y específicamente Attiogbe & Rizkalla (1988); se formulan las bases para el desarrollo de esta metodología que caracterice y cuantifique el efecto del DAR, en rocas sanas y el concreto lanzado, mediante mediciones de cambios de masa, dimensionales y mineralógicos en las rocas que conforman los macizos rocosos expuestos en los cortes de la carretera y en los materiales de las estructuras de concreto usadas para contención de los taludes y que sean la base de estudios futuros sobre el impacto del DAR en diferentes materiales.

1.4 Hipótesis

Si las rocas sanas que afloran en las inmediaciones de la RN-27 y el concreto lanzado diseñado y proyectado con las mismas especificaciones del que fue colocado en los taludes, son expuestas a disoluciones ácidas que simulan el DAR, entonces se darán cambios en sus propiedades físicas y mineralógicas que afecten sus características originales. Pero si el material utilizado no tiene componente calcáreo este no reaccionará con el ácido y no se producirán cambios.

1.5 Personal que interviene

Profesionales en geología, químicos e ingenieros civiles, técnicos y/o estudiantes con experiencia en trabajos en laboratorios.

1.6 Definiciones y unidades

Drenaje Ácido: escurrimiento de soluciones ácidas sulfatas, con un contenido significativo de metales disueltos, resultado de la oxidación química y biológica de minerales sulfurados y de la lixiviación de metales pesados asociados.

Drenaje Ácido de Roca: acidificación de las aguas naturales por la oxidación de rocas que contienen minerales metálicos ricos en azufre o sulfuros.

1.7 Sistema Internacional de Unidades

Masa: gramos (g)

Dimensiones: centímetros (cm)

Volumen: gramos/centímetro cúbico (g/cm^3)

Temperatura: grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$)

1.8 Seguridad y riesgos

Es importante que las personas que lleven a cabo los ensayos tengan presentes las normas y precauciones para la manipulación de los reactivos y los equipos; respeten las medidas de seguridad que garanticen una adecuada recepción, manipulación y almacenamiento de las sustancias químicas, así como de los residuos generados en el laboratorio.

Es obligatorio el uso de los accesorios de protección y evitar el contacto directo con el ácido sulfúrico porque produce quemaduras de alto grado.

1.9 Condiciones de almacenamiento seguro

Conservar en lugar fresco, seco y bien ventilado. Mantener alejado del calor y la humedad. Mantener la zona limpia de productos combustibles.

1.10 Equipo de protección personal en el laboratorio

Lentes de seguridad, gabacha larga con manga larga, guantes de nitrilo, zapatos cerrados, mesa metálica de trabajo.

1.11 Equipo de protección personal en el campo

Ropa cómoda, pantalón largo, chaleco reflectivo, casco, zapatos cerrados, lentes de seguridad.

1.12 Algunos comentarios generales

- La preparación de la disolución puede variar dependiendo de la capacidad del responsable del ensayo.
- Precauciones relativas al medio ambiente: Evitar que el producto llegue a las alcantarillas o aguas superficiales.
- Métodos y material de contención y limpieza: Recoger el líquido procedente de la fuga en recipientes. En caso se derrame, neutralizar con un material alcalino y luego absorberlo con arena o tierra; no absorber el derrame con serrín u otros materiales combustibles. Trasladar los productos absorbentes a un vertedero controlado o almacenamiento seguro para que sean tratados por un gestor de residuos autorizado.

2. EQUIPO Y MATERIALES DE LABORATORIO

2.1 Equipo

- Balanza analítica de 0.1 g Explorer Pro (código BZ051 Lanamme 282472)
- Balanza analítica de 0.1 g Explorer Pro (código BZ052 Lanamme 282472)
- Balanza analítica de 0.001 g Explorer OHAVS (código BZ001 Lanamme 175286)
- Horno industrial Heraeus® (placa UCR191225)
- Purificador de agua Direct 8 Milli-Q Millipore® (placa UCR323671)
- pH metro OAKTON PC2700 (placa UCR367843)
- Agitador eléctrico THOMAS SCIENTIFIC (placa 264487)
- Vernier digital de 15 cm (Mitutoyo, código PR-018)
- Cortador industrial
- Extractor de núcleos HILTI DD130
- Microscopio óptico NIKON Eclipse LV100NPOL (placa 368154)
- Microscopio Electrónico de Barrido

2.2 Materiales

- 25 Recipientes medianos de vidrio grueso tipo pyrex
- Hisopo mediano con cerdas suaves
- Papel parafina
- Cámara fotográfica
- Piqueta y mazo
- Marcador permanente

2.3 Cristalería

- Beaker de 1000 ml
- Probeta aforada de 500ml
- Pipeta clase A de 1 ml, 2 ml y 5 ml.
- Balón aforado de 1000 ml
- Campana de gases
- Gotero

2.4 Reactivos requeridos

- Ácido sulfúrico, 95-97% p.a. EMSURE® ISO
- Agua ultra pura fresca con resistividad 18,2MΩ/cm.
- Disoluciones estándares de pH 4,0; pH 7,0 y pH 10,0

2.5 Muestras

- 8 Cilindros de roca (diámetro 4,5 cm x ancho 9 cm, relación 1:2)
- 8 Prismas de roca (ancho 4,5 cm x largo 9 cm, relación 1:2)
- 40 Cilindros de concreto lanzado (diámetro 4,5 cm x ancho 9 cm, relación 1:2)

3. PREPARACIÓN DE MATERIAL

3.1 Procedimiento para el muestreo en el campo

Se realiza en los estacionamientos del km 39+000 y km 48+000, debido que ahí afloran los dos tipos de roca representativos de la zona de estudio; brecha volcánica y andesita, respectivamente. En cada talud se debe localizar un sitio no impactado por el DAR, para extraer muestras sanas.

Muestras de andesita:

1. En el estacionamiento km 48+000, se extrae un bloque de roca andesítica, con tamaño mínimo de 20 cm x 30 cm.
2. El bloque se debe cortar, en prismas de 4,5 cm de ancho y 9 cm de largo, en el laboratorio con una cortadora industrial.
3. Se lava cada muestra, con un cepillo de cerdas suaves y agua para eliminar material externo adherido en el proceso de cortado.
4. Con el marcador permanente se escribe el código de la muestra en su superficie. Se sugiere escribir la inicial del tipo de muestra y un consecutivo.

Muestras de brecha volcánica

1. En el estacionamiento del km 39+000, se extrae la brecha volcánica, y al ser una roca de alta dureza, se utiliza un extractor de núcleos con broca de 2 pulgadas de diámetro.
2. Los núcleos de brecha volcánica se deben cortar de forma transversal con una longitud de 9 cm, con un cortador industrial.
3. Se lava cada muestra, con un cepillo de cerdas suaves y agua para eliminar material externo adherido en el proceso de cortado.

5. Con el marcador permanente se escribe el código de la muestra en su superficie.
Se sugiere escribir la inicial del tipo de muestra y un consecutivo.

3.2 Procedimiento muestreo de concreto tipo lanzado

Se utilizan dos paneles con dimensiones de 50 cm de ancho, 50 cm de largo y 15 cm de alto, muestreados de una pared construida con concreto lanzado fino con una resistencia a la compresión a 28 días de 280 kg/cm².

Los paneles se deben curar por un periodo de 28 días en una cámara húmeda. Este proceso consiste en el mantenimiento de contenidos de humedad y de temperaturas satisfactorios en el concreto durante un periodo definido, con el objetivo de aumentar la resistencia y durabilidad (Attiogbe & Rizkalla, 1988).

Se utiliza un extractor de núcleos marca HILTI DD130, con una broca de 2 pulgadas:

1. Colocar el extractor en dirección vertical a la roca
2. Extraer la muestra con enfriamiento de agua.
3. Cortar cada muestra de manera transversal a un largo de 9 cm, con una cortadora industrial
4. Lavar cada muestra, con un cepillo de cerdas suaves y agua para eliminar material externo adherido en el proceso de cortado.
5. Con el marcador permanente se escribe el código de la muestra en su superficie.
Se sugiere escribir la inicial del tipo de muestra y un consecutivo.

3.3 Secado de las muestras

Para realizar las mediciones de las propiedades físicas, se debe eliminar la humedad presente en todas las muestras (roca y concreto lanzado).

Procedimiento:

1. Se colocan las muestras en una bandeja de metal.
2. Se introducen en un horno industrial, por un periodo 24 horas a 105° C.
3. Se deja enfriar a temperatura ambiente por 3 horas.

3.4 Medición de masa de las muestras

Se debe medir la masa en seco en todas las muestras.

Procedimiento:

1. Se limpia cada muestra con una brocha de cerdas suaves para quitar material adherido superficialmente.
2. Se pesa en la balanza analítica de 0,001 \pm 0.0005 g y se registran los datos.

3.5 Medición de dimensiones de las muestras

Se realiza las mediciones en el diámetro y en la longitud del espécimen. Las mediciones se hacen con un vernier en tres sitios diferentes de cada muestra para obtener un promedio, esto porque las muestras no son completamente regulares.

Procedimiento:

1. Se mide el diámetro en la superficie, en la base y en el medio. Se registra y se obtiene el promedio.
2. Se mide la longitud en tres sitios diferentes. Se registra y se obtiene el promedio.

3.6 Medición de volumen de las muestras

La medición del volumen se hace conforme a la norma ASTM C39 (2017):

Procedimiento:

1. Se mide la masa seca de la muestra (sección 3.4).
2. Se mide la masa sumergida no saturada de la muestra.
3. Con la densidad del agua a la temperatura respectiva, se calcula el volumen de la muestra, con la siguiente formula.

Considerando que la densidad agua (22 °C) = 0,99780 g/cm³.

$$\frac{\text{masa seca} - \text{masa (sumergida)}}{\text{densidad del agua (22}^{\circ}\text{C)}}$$

3.7 Descripción microscópica

El análisis mineralógico brinda una mejor comprensión del comportamiento del material en contacto con el DAR, por lo tanto, se realizan descripciones a nivel microscópico y microestructural.

Se deben realizar las descripciones en la condición inicial y final de las muestras, con el objetivo de observar los cambios mineralógicos y texturales causados por el contacto con ambientes ácidos

3.7.1 Microcopia Óptica

Se utiliza un microscopio óptico y se describen las características mineralógicas y texturales de las muestras. La preparación de secciones delgadas se realiza en el Laboratorio de Petrografía de la Escuela Centroamericana de Geología.

Nota: El análisis debe ser realizado por profesionales con conocimientos en petrografía.

3.7.2 Microestructural

Con el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) se realiza un análisis Dispersión de Rayos X (DRX), para obtener el espectro elemental de las muestras y la toma de fotografías a nivel microestructural.

Las muestras deben tener dimensiones máximas de 150 mm de altura, 30 mm de diámetro y un peso máximo de 150 g.

Para obtener una mejor resolución en las imágenes, se coloca una cobertura de oro sobre las muestras. Estas deben estar completamente secas, preferiblemente con poca porosidad y tener el menor tamaño posible.

Nota: El manejo del equipo debe ser realizado por un experto en microscopia electrónica.

3.8 Preparación de disoluciones y mezclas

Preparación del lugar de trabajo

- pH metro calibrado
- Agua destilada disponible
- Toallas de papel
- Etiquetar cada recipiente con el nombre del proyecto, responsable del proyecto, fecha de inicio del ensayo y valor de pH de la disolución que tiene.

Actividades de valoración

- Espacio libre y limpio de trabajo
- Espacio para el resguardo de los recipientes
- Mesa de trabajo metálica

3.8.1 Procedimiento para la preparación de disolución ácida

Se debe preparar disoluciones con pH 2,0, pH 4,0 y pH 5,5.

Utensilios:

- Campana de gases
- Probeta aforada de 500ml
- Pipeta clase A de 1 ml, 2 ml y 5 ml
- Balones aforados de 1000 ml (3).

Como al ácido sulfúrico es un ácido fuerte y tiene una concentración entre 95% a 97%, entonces se toma en cuenta la concentración media de 96%, a una temperatura de 25°, con una densidad de 1,8305 kg/L.

$$C_i \left(\frac{\text{mol}}{\text{L}} \right) = \frac{V_f(\text{ml})}{\rho_{\text{H}_2\text{SO}_4} \left(\frac{\text{g}}{\text{mL}} \right)} \cdot \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ ml}} \cdot \frac{\text{MM H}_2\text{SO}_4 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)}{\frac{\text{P}\% \text{ H}_2\text{SO}_4}{100}} = \text{Vol (ml) de H}_2\text{SO}_4 \text{ al P}\%$$

Donde:

C_i = Concentración nominal de la disolución de interés (mol/L)

V_f = Volumen final de la concentración de interés (ml)

$\rho_{H_2SO_4}$ = densidad de ácido sulfúrico a P % a 25 °C (g/ml)

MM H_2SO_4 = Masa Molar del ácido sulfúrico. 98,078 g/mol H_2SO_4

P % = porcentaje de ácido sulfúrico de la disolución inicial.

Vol. = volumen de ácido sulfúrico al P % que debe tener la alícuota (ml)

Para preparar 500 ml de disolución de cada valor de pH, en el Cuadro 1 se muestra las concentraciones iniciales, el volumen y la masa inicial de la solución de ácido sulfúrico. La disolución se prepara con agua destilada.

Cuadro 1. Concentración de ácido para cada valor de pH requerido.

pH	Concentración (mol/l)	Volumen inicial (ml)	Masa inicial (g)
2,00	6,471E-03	0,1805695	0,33053
4,00	5,021E-05	0,0014011	0,00256
5,50	1,581E-06	0,0000441	0,00008

4. EJECUCIÓN

Consideraciones

Los procedimientos se realizan por triplicado para las muestras de concreto y las muestras de roca son únicas.

Condición Inicial

Todas las muestras a ensayar, son sometidas a los procedimientos de la sección 3.3 a la 3.6, en condición inicial, para obtener los datos de las propiedades físicas, previo al contacto con disoluciones ácidas.

La descripción microscópica en condición inicial -sana- se realiza en tres muestras: una de cada tipo material (1 de andesita, 1 de brecha volcánica y 1 de concreto lanzado) y se consideran una muestras representativas.

4.1 Preparación general de los ensayos en laboratorio de Ciclo Continuo y Ciclo Alternado

Se utilizan 15 muestras de concreto lanzado, 5 muestras de brecha volcánica y 5 muestras de andesita. Se debe rotular el recipiente con el respectivo valor de pH de la disolución y el código de muestra que contenga.

1. Se introducen las muestras en el recipiente.
2. Se sella cada recipiente con papel parafina.

Control de pH

1. Se saca la muestra del recipiente.
2. El recipiente se debe colocar sobre el agitador electrónico.
3. Se introduce el pH-metro y se registra la medición.
4. Si el pH de la disolución se mantiene en un rango $\text{pH} \pm 0,5$ del valor de pH respectivo, no se realiza ningún cambio.
5. Si el pH de la disolución sobrepasa o disminuye el rango de $\text{pH} \pm 0,5$ respectivo, la disolución debe ser renovada por el pH correspondiente a la muestra.
6. Si la disolución en el recipiente tiene una apariencia turbia, debe ser renovada por disolución fresca con su respectivo pH.

4.2 Ensayo Ciclo Alternado

El objetivo del ensayo es recrear de manera sistemática, controlada y acelerada, las condiciones ácidas, abrasión y cambios térmicos que se presentan en los taludes de la RN-27, sobre el material rocoso y concreto lanzado.

El ensayo tiene un periodo total de 85 días, dividido en 5 ciclos intermedios, que finalizan en los días 11, 25, 46, 67 y 85. Se utilizan disoluciones ácidas con valores de pH $2,0 \pm 0,5$, pH $4,0 \pm 0,5$ y pH $5,5 \pm 0,5$.

Para la ejecución del experimento se requieren 9 recipientes de vidrio, 3 muestras de andesita, 3 muestras de brecha volcánica y 9 muestra de concreto lanzado. Se debe preparar 3 recipientes para cada tipo de disolución. En cada recipiente se debe sumergir 1 muestra de andesita, 1 muestra de brecha volcánica y 3 de concreto lanzado, este último en el mismo recipiente.

Cuando el agua está turbia o sucia se debe cambiar la disolución completa, para mantener un ambiente cristalino. Se realiza un control diario del valor de pH de las disoluciones, ya que si sobrepasa o disminuye el valor de pH en $\pm 0,5$, este debe ser renovado al valor respectivo inicial y así mantener las condiciones originales y propuestas en los experimentos.

Se realizan descripciones diarias de las condiciones de la disolución y de la muestra. Con los datos registrados se efectúa una comparación de las características iniciales y finales.

Se miden la masa y dimensiones, en cada ciclo intermedio, para observar la evolución del impacto en las muestras.

Procedimiento:

Se repite este procedimiento los días 11, 25, 46, 67 y 85:

1. Se sacan las muestras del recipiente con disolución.
2. Se describe el estado de la disolución y la muestra.
3. Se lavan con la ayuda de un hisopo de cerdas suaves y con agua de potable, para eliminar cualquier exceso de la superficie
4. Se realiza el procedimiento de la sección 3.3, 3.4, 3.5.
5. Se introducen nuevamente en la disolución ácida.
6. Se cubre el recipiente con papel parafina.
7. El día 85 se realiza la sección 3.6
8. Al final el experimento, se realiza el análisis microscópico de la sección 3.7

Notas:

- En todos los pasos hay que tomar las medidas necesarias para evitar la contaminación cruzada entre las muestras o los patrones.
- Este protocolo y sus mediciones tienen que ser consistentes cada vez que se aplique.
- Después de cada medida si hay un cambio mayor a $\pm 0,5$ en el pH de la solución, este debe ser cambiado por el pH adecuado.

- Esta metodología es una adaptación del ensayo de Attiogbe & Rizkalla (1988) a rocas sanas para saber el efecto del DAR en ellas.

4.3 Ensayo Ciclo Continuo

El objetivo del ensayo es recrear en el laboratorio el efecto del DAR en muestras que se encuentren en contacto directo con la disolución ácida y sin ningún tipo de tratamiento de abrasivo o cambios de temperatura. El ensayo tiene un periodo total de 85 días, sin interrupción.

Para la ejecución del experimento se requieren 6 recipientes de vidrio, 2 muestras de andesita, 2 muestras de brecha volcánica y 6 muestras de concreto lanzado. Se debe preparar 3 recipientes con disolución ácida pH 2,0 y otros 3 con disolución ácida pH 4,0. En cada tipo de disolución se debe sumergir 1 muestra de andesita, 1 muestra de brecha volcánica y 3 de concreto lanzado, este último en el mismo recipiente.

Cuando el agua está turbia o sucia se debe cambiar la disolución completa, para mantener un ambiente cristalino. Se realiza un control diario del valor de pH de las disoluciones, si este sobrepasa o disminuye el valor de pH en $\pm 0,5$, este debe ser renovado al valor respectivo inicial y así mantener las condiciones originales y propuestas en los experimentos.

Se realizan descripciones diarias de las condiciones de la disolución y de la muestra. Las mediciones de masa, dimensiones y volumen, se hacen al inicio y al final del periodo, para comparar los cambios en las propiedades físicas de las muestras.

Procedimiento:

1. Se sumergen las muestras en la disolución y se sellan con papel parafina.
2. Se describe el estado de la disolución y la muestra diariamente.
3. Al finalizar el periodo de 85 días, se realiza el procedimiento de la sección 3.3, 3.4, 3.5, 3.6.
4. Al final del experimento, se realiza el análisis microscópico de la sección 3.7

4.4 Ensayo In situ.

El siguiente procedimiento es una guía para ensayos similares en taludes de carreteras en diferentes sitios.

El ensayo tiene como objetivo caracterizar y cuantificar el efecto del DAR en campo, en muestras sanas de concreto lanzado. Se colocaron 16 muestras distribuidas en los estacionamientos km 38+600, km 47+000 y km 48+000 (sitios con presencia de DAR confirmado), por un periodo de tiempo de 11 meses. Las condiciones de acidez, temperatura y humedad, a las que fueron expuestas las muestras, varían según las características presentes en cada talud. Al ser enterradas al pie de los taludes afectados por DAR, se encuentran en condiciones similares a las de los paneles de concreto lanzado que están en contacto directo con el talud y la escorrentía de este.

Para efectos de ubicación de taludes se considera talud derecho o talud izquierdo, como referencia a la vía en sentido San José – Caldera.

- En el estacionamiento km 38+600, se colocan 3 muestras en el margen izquierdo del talud y 3 en el margen derecho del talud, para un total de 6 muestras.
- En el estacionamiento km 47+000, se colocan 4 muestras en el margen izquierdo del talud.
- En el estacionamiento km 48+000, se colocan 3 muestras en el margen izquierdo del talud y 3 en el margen derecho del talud, para un total de 6 muestras.

Equipo de campo:

- GPS
- Piqueta
- Palita
- Libreta de campo
- GPS
- Bolsas plásticas

Procedimiento:

1. Se selecciona un sitio al pie del talud, cerca de la cuneta donde la escorrentía infiltre con facilidad.
2. Se entierran a una profundidad de entre 2 cm y 7 cm.
3. Tiempo de exposición 11 meses.

Al finalizar el periodo:

1. Se extraen los cilindros de concreto.
2. Se guardan en bolsas plásticas con su respectivo código.
3. Se cepillan las muestras, para remover los excesos de tierra y se realiza el lavado con agua potable.
4. Se realizan las mediciones de sus propiedades físicas y análisis mineralógicos con los procedimientos de la sección de la 3.3 hasta la 3.7.

Precauciones

Se deben enterrar las muestras en sitios de fácil acceso y donde no haya peligro de que terceros lo remuevan o lo alteren.

4.5 Ensayo de núcleos expuestos directamente al flujo de DAR.

El ensayo tiene como objetivo caracterizar los cambios de las muestras de concreto lanzado bajo un flujo constante de agua ácida. Se realiza un experimento *in situ* con las condiciones naturales del DAR y del talud, por un periodo de 3 meses y otro en el laboratorio con las condiciones de pH controladas, por un periodo de 1 mes para cada valor de pH.

Este ensayo se llama tipo ducha ácida, debido a que la muestra se encuentra bajo de un flujo o goteo constante de drenaje ácido que simula una ducha, generando también un tratamiento abrasivo sobre ella.

4.5.1 Ensayo de Ducha ácida en campo

Se debe seleccionar un sitio con goteo constante de aguas ácidas, en los estacionamientos km 38+600 y km 45+000. Se requieren 2 muestras de concreto lanzado, 1 de andesita y 1 de brecha volcánica.

En el estacionamiento km 38+600, se coloca 1 muestra de concreto lanzado y 1 de brecha volcánica, esta última por ser el tipo de roca aflorante en el sitio.

En el estacionamiento km 45+000, se coloca 1 muestra de concreto lanzado y 1 de andesita, esta última por ser el tipo de roca aflorante en el sitio.

Procedimiento:

1. Se colocan las muestras bajo un flujo constante de DAR en el campo. La muestra de roca debe ser el mismo tipo de roca que aflora en el sitio.

Al finalizar el periodo de 3 meses.

1. Se realiza el procedimiento de la sección 3.3 hasta la 3.7.

Nota: El sitio debe estar completamente identificado y procurar que las muestras no sean enterradas por caída de material erosionado.

4.5.2 Ensayo de Ducha ácida en laboratorio

Para recrear en el laboratorio las condiciones de contacto con un flujo de agua ácida en condiciones oxigenadas, se utiliza una bomba de agua de uso subacuático para humedecer constantemente las muestras de concreto, como se observa en la Figura 1.



Figura 1. Ducha ácida en laboratorio.

Se utilizaron tres muestras de concreto lanzado cada uno en disoluciones con valores de pH 2, pH 4 y pH 5,5 expuestos por 1 mes cada uno. La muestra expuesta a la disolución con el valor de pH 2, tuvo un total de 3 meses de exposición. El flujo sobre la muestra se mantenía en continuo por 8 horas diarias, 5 días a la semana. Los periodos en que no se proporcionaba flujo de agua sobre la muestra, recrean los momentos que no hay flujo en el campo.

En todo el periodo la muestra todo el tiempo se está a temperatura ambiente y tenía un control diario del valor de pH, para que este se mantuviera dentro del rango deseado de $\text{pH} \pm 0,5$.

Materiales:

- Bomba de pequeño tamaño de 80GPH con una manguera de plástico grueso.
- Recipiente de vidrio grueso
- Tiempo de ensayo 1 mes cada valor de pH (5,5 4, 2)
- 3 muestras de concreto lanzado

Procedimiento:

1. Introduce la muestra dentro del recipiente con la bomba, de forma tal que la bomba genere escorrentía sobre la muestra.
2. Se realiza un monitoreo del valor de pH correspondiente, todos los días (excepto fines de semana) y se renueva la disolución si sobrepasa un rango de pH valor $\pm 0,5$.

Al finalizar el periodo correspondiente, se extrae la muestra.

3. Se realizan los procedimientos de la sección 3.3 a la 3.5.

5. REFERENCIAS

ATTIOGBE, E.K. & RIZKALLA, S.H., 1988: Response of concrete to sulfuric acid attack.-8 pp. ACI Materials Journal. Title no. 85-M4.

KERKHOFF, B., 2007: Effects of substances on concrete, guide to protective treatments.-35 pp. Portland Cement Association. Washington, DC. Estados Unidos.

DOLD, B., 2010: Gestión de residuos y minería sostenible. Basic concepts in environmental geochemistry of sulfidic mine-waste management.- 37 pp. Universidad Internacional de Andalucía.

GRANDIA, F., SALAS, J., ARCOS, D., ARCHAMBAULT, A. & COTTARD, F., 2009: Impacto del drenaje ácido de explotaciones mineras en la cuenca del Río Margarita y Embalse de Hatillo (República Dominicana).- Bol. Geol. Minero, 120(4): 595-606.

MONTENEGRO, J.C., 2008: Efecto de los residuos mineros en la durabilidad del concreto, el caso de soluciones ácidas sulfuradas.- 7 pp. Reporte metalúrgico y de materiales – No. 6. La Paz, Bolivia.

RUIZ, P., ARAUZ, A., GARCÍA, J., VILLALOBOS, G., SEDÓ, A & SUÁREZ, C., 2015: Drenaje ácido de rocas en taludes de la ruta nacional 27, San José - Caldera, Costa Rica.- Rev. Geol. Amer. Central, 53: 25-46.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) OFFICE OF SOLID WASTE SPECIAL WASTE BRANCH., 1994: Technical document acid mine drainage prediction.- 52 pp. Epa530-R94-036 Ntis Pb94-201829.

SERNAGEOMIN., 2002: Guía metodológica Drenaje Ácido Industria Minera.- 39 p. Servicio Nacional Geología y Minería de Chile. Chile.

VARGAS, A. & FERNANDEZ, J.F., 2002: Aplicación de una metodología para evaluar la agresividad del agua hacia estructuras de concreto.- Rev. Geol. Amer. Central, 27: 125-132.

6. ANEXOS

Machotes (plantillas) de la hoja para anotar datos en el laboratorio.

7.1 Control de pH

Muestra Código: pH: Ensayo:								
Fecha	# Día	pH		Temp. Inicial	Temp. Final	Observaciones agua	Observaciones muestra	Observaciones procedimiento
		Inicial	Final					

7.2 Mediciones de masa para el Ciclo Alternado

	Inicial	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5
Código	Masa (g)	Masa (g)	Masa (g)	Masa (g)	Masa (g)	Masa (g)

7.3 Mediciones de dimensiones

	Fecha							
Código	Diámetro (mm)				Longitud (mm)			
	Med. 1 (superior)	Med. 2 (medio)	Med. 3 (base)	Prom.	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Prom.

7.4 Mediciones de volumen

Fecha							
Código	Masa seca (g)	Masa sumergida (g)	Temp. Agua (°C)	Densidad Agua (g/cm ³)	Dif. Masas (seca - sumergida)	Volumen (cm ³)	Densidad de la muestra (g/cm ³)