

ESCUELA POLITENICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

**“UTILIZACIÓN DE LA CENIZA VOLCÁNICA, CON DIFERENTES
MÉTODOS DE ACTIVACIÓN PUZOLÁNICA, PARA LA
ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON RESISTENCIA A
COMPRESIÓN MENOR A 80 KN/M²”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

LLUMIGUSIN SARZOSA, LUIS FERNANDO

luisfer1058@hotmail.com

PALLANGO UNAPANTA, MARÍA JOSÉ

majo9705@hotmail.com

DIRECTOR: ING. LUNA HERMOSA GERMÁN VINICIO, MSc.

german.luna@epn.edu.ec

**CO-DIRECTOR: ING. VILLACIS TRONCOSO EUGENIA DE LAS
MERCEDES, MSc.**

mercedes.villacis@epn.edu.ec

Quito, Septiembre 2022

DECLARACION

Nosotros, Llumigusin Sarzosa, Luis Fernando y Pallango Unapanta, María José, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría, que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional, y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Llumigusin S. Luis Fernando

Pallango U. María José

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Llumigusin Sarzosa Luis Fernando y Pallango Unapanta María José, bajo nuestra supervisión.

**Ing. Luna Hermosa Germán
Vinicio, MSc.**

DIRECTOR DE PROYECTO

**Ing. Villacis Troncoso Eugenia de
las Mercedes, MSc.**

CODIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A mis queridos padres, Blanca y Fernando, por apoyarme en esta travesía, ser mi inspiración y fortaleza para poder culminar esta etapa muy importante. Por todos los ánimos que me dieron y permitirme soñar en grande, les agradezco la vida y los amo con todo mi corazón.

A mis hermanas, Fernanda y Jackeline, quienes desde que llegue al mundo han estado a mi lado, apoyándome, aconsejándome y reprimiéndome, de ser el caso, no solo han sido mis hermanas, sino también mis amigas e incluso mis otras madres, por todo el amor y comprensión que he recibido de su parte, nunca dejare de quererlas.

A mis sobrinos, mis pequeños Sophia y Sebastián, por llenar mi vida de sonrisas y alegrías con cada una de sus ocurrencias.

A mi cuñado Michael Rodríguez, por su amistad y apoyo todos estos años y ser como un hermano para mí.

A mis tías, Marisol y Elizabeth, por su cariño y consejos. A mis primos Alejandro, Jonathan, Karen, Jessy, Jimmy y Michelle por su amistad.

A mis tíos y padrinos, José Luis y Nelly Sarmiento, por su apoyo y cariño a pesar de la distancia.

A mi director de tesis, Ing. Germán Luna, y a mi codirectora, Ing. Mercedes Villacis, por darnos la oportunidad de participar en este proyecto y brindarnos toda la ayuda requerida para su culminación. Gracias por todas sus enseñanzas en el transcurso de esta investigación y a lo largo de mi vida estudiantil.

A mi mejor amiga y compañera de tesis, María José Pallango, me es grato culminar esta etapa junto a una de las primeras personas con quien hice amistad al empezar mi carrera de ingeniería civil y con quien tenemos tantos recuerdos en toda esta etapa universitaria, por levantarnos y animarnos mutuamente cuando el otro sentía

que no podía más, con el objetivo de que este día llegara. Gracias por ser parte de mi vida. ¡Lo logramos!

A mis “esperancitos”, Kevin Rodríguez y Adriana Huertas, por su amistad y apoyo en cada semestre transcurrido, gracias a ustedes la universidad no fue solo un lugar de estudio, sino también de risas, alegrías y chismes, espero mantener esta hermosa amistad por toda la vida y celebrar juntos más logros, académicos, profesionales y personales.

A mi amigo Sebastián Villafuerte, por todas las risas y complicidades fuera y dentro de la universidad.

Por último, quiero agradecer a la Escuela Politécnica Nacional por acogerme en sus instalaciones y prepararme para mi carrera universitaria. Gracias a la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental y a todos los profesores que conocí, quienes fueron parte clave para mi formación académica y profesional.

Luis Fernando Almiguésin Sarzosa

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por sus inmensas bendiciones, por ser mi guía en cada paso que doy, mi fortaleza y por haber puesto en mi camino a todos quienes han sido mi soporte. A mis amados padres por su cariño y sacrificio de tantos años, por los principios inculcados, por creer en mis capacidades e impulsar mis sueños, gracias a ustedes estoy cumpliendo una meta más de mi vida. A mi hermano y abuelitos quienes, con sus palabras de apoyo, buenos deseos y ayuda, me han acompañado en este proceso.

A mi compañero de tesis y mejor amigo Fernando Llumigusín, por el gran apoyo dentro y fuera de la universidad, por sus consejos, momentos compartidos y años de amistad incondicional.

A mis amigos Adriana Huertas, Kevin Rodríguez y Santiago Miniguano, quienes se han convertido en amigos de vida y colegas, hemos compartido anécdotas inolvidables.

A mi director de tesis Ing. Germán Luna y a mi codirectora Ing. Mercedes Villacís por sus conocimientos, su ayuda y dirección durante toda esta investigación.

Finalmente, a la prestigiosa Escuela Politécnica Nacional por la oportunidad de formarme profesionalmente con el nivel y conocimientos necesarios, gracias a la acertada guía de sus docentes.

María José Pallango Unapanta

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres Fernando y Blanca, sin su amor, apoyo y guía ésto no habría sido posible.

A mis hermanas Fernanda y Jackeline, por estar conmigo y escucharme cuando lo necesitaba.

A mis sobrinos Sophia y Sebastian, por ser la razón de mis sonrisas, quienes junto con sus abrazos y besos arreglaban cualquier día malo.

A mis angelitos Mamita Zholy, Papito Julito y abuelita Manuelita, por guiarme y bendecirme desde el cielo.

Les dedico con mucho amor este trabajo.

Luis Fernando Lumigués Sarzosa

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado con mucho amor a mis padres José Pallango y Rosario Unapanta por ser mi ejemplo, mi inspiración y quienes me han apoyado incondicionalmente durante toda mi vida, sus enseñanzas y compañía han sido mi pilar y el impulso para cumplir esta y todas mis metas. A mi hermano menor Mauricio Pallango, por su preocupación y cariño, y por quien tengo el compromiso de ser un ejemplo y seguir adelante. Son la bendición más grande de mi vida.

María José Pallango Unapanta

ÍNDICE

DECLARACION	I
CERTIFICACIÓN	II
AGRADECIMIENTO.....	III
AGRADECIMIENTO.....	V
DEDICATORIA.....	VI
DEDICATORIA.....	VII
ÍNDICE	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	XII
ÍNDICE DE FIGURAS	XVI
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	XXII
RESUMEN	I
ABSTRACT	II
PRESENTACIÓN	III
CAPÍTULO 1 GENERALIDADES	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.2.1. OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3. JUSTIFICACIÓN	3
1.3.1. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA.....	3
1.3.2. JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA	3
1.3.3. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA.....	4
1.4. ALCANCE	4
1.5. ORIGEN DE LA MUESTRA DE SUELO	5
1.5.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA	5

1.6.	ORIGEN DE LAS MUESTRAS DE CENIZAS VOLCÁNICAS	5
1.6.1.	VOLCÁN COTOPAXI	5
1.6.2.	VOLCÁN GUAGUA PICHINCHA	7
1.6.3.	VOLCÁN TUNGURAHUA.....	9
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTO TEÓRICO		13
2.1.	CONSISTENCIA DEL SUELO	13
2.1.1.	CLASIFICACIÓN	13
2.1.2.	SUELOS BLANDOS.....	13
2.2.	CENIZA VOLCÁNICA	14
2.2.1.	CENIZA DEL VOLCÁN TUNGURAHUA.....	16
2.2.1.1.	COMPOSICIÓN MINERALÓGICA.....	17
2.2.2.	CENIZA DEL VOLCÁN COTOPAXI	17
2.2.2.1.	COMPOSICIÓN MINERALÓGICA.....	19
2.2.3.	CENIZA DEL VOLCÁN GUAGUA PICHINCHA.....	19
2.2.3.1.	COMPOSICIÓN MINERALÓGICA.....	21
2.3.	ACTIVADORES PUZOLÁNICOS	21
2.3.1.	CAL.....	23
2.3.2.	CEMENTO.....	24
2.3.2.1.	PRINCIPALES COMPONENTES	25
2.3.2.2.	COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO	25
2.3.3.	HIDRÓXIDO DE SODIO	26
2.3.3.1.	PROPIEDADES FÍSICAS	26
2.4.	ESTABILIZACIÓN DE SUELOS	27
2.4.1.	GENERALIDADES	27
2.4.2.	ESTABILIZACIÓN QUÍMICA	27
2.4.2.1.	ESTABILIZACIÓN CON CAL.....	27
2.4.2.2.	ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO	28

2.4.2.3. ESTABILIZACIÓN CON CENIZA VOLANTE	29
2.4.3. ESTABILIZACIÓN MECÁNICA.....	30
2.4.3.1. VIBROFLOTACIÓN	30
2.4.3.2. COMPACTACIÓN.....	30
CAPÍTULO 3 MUESTREO Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS Y ENSAYOS ...	31
3.1. MUESTREO DEL SUELO.....	31
3.2. MUESTREO DE LAS CENIZAS VOLCÁNICAS.....	32
3.2.1. CENIZA DEL VOLCÁN TUNGURAHUA.....	33
3.2.2. CENIZA DEL VOLCÁN COTOPAXI	34
3.2.3. CENIZA DEL VOLCÁN GUAGUA PICHINCHA.....	35
3.3. PREPARACIÓN DE LA PUZOLANA.....	36
3.4. PREPARACIÓN DE HIDRÓXIDO DE SODIO	39
3.5. DOSIFICACIONES DE LAS MEZCLAS.....	41
3.6. ENSAYOS EN MUESTRAS DE SUELO NATURAL	42
3.6.1. GRANULOMETRÍA POR LAVADO	42
3.6.2. LÍMITES DE ATTERBERG.....	46
3.6.2.1. LÍMITE PLÁSTICO.....	46
3.6.2.2. LÍMITE LÍQUIDO.....	48
3.6.3. CLASIFICACIÓN SUCS	50
3.6.4. COMPACTACIÓN PROCTOR ESTÁNDAR.....	53
3.6.5. COMPRESIÓN SIMPLE	58
3.6.6. CORTE DIRECTO.....	64
3.7. ENSAYOS EN CENIZAS VOLCÁNICAS	72
3.7.1. DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	72
3.7.2. TERMOGRAVIMETRÍA	76
3.8. ENSAYOS EN MUESTRAS DE SUELO ESTABILIZADO	79
3.8.1. PROCTOR ESTÁNDAR	79

3.8.2.	COMPRESIÓN SIMPLE	81
3.8.3.	CORTE DIRECTO	93
3.8.4.	DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	95
3.8.5.	TERMOGRAVIMETRÍA	98
CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES.....		101
4.1.	RESULTADOS DE MUESTRAS NATURALES Y ESTABILIZADAS.....	101
4.1.1.	PRÓCTOR ESTÁNDAR	101
4.1.2.	RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE	104
4.1.3.	CORTE DIRECTO	107
4.1.4.	TERMOGRAVIMETRÍA	110
4.1.5.	DIFRACCIÓN POR RAYOS X.....	111
4.2.	ANÁLISIS COMPARATIVO DE MUESTRAS NATURALES Y ESTABILIZADAS PARA DIFERENTES CENIZAS VOLCÁNICAS DE REEMPLAZO	112
4.2.1.	PRÓCTOR ESTÁNDAR	112
4.2.2.	RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE	118
4.2.3.	CORTE DIRECTO	128
4.2.4.	TERMOGRAVIMETRÍA	145
4.2.5.	DIFRACCIÓN POR RAYOS X.....	147
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		148
5.1.	CONCLUSIONES.....	148
5.2.	RECOMENDACIONES	150
BIBLIOGRAFÍA		152
ANEXOS		161

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Coordenadas utm punto de muestreo de suelos.....	5
Tabla 2 Descripción cronológica de eventos eruptivos del volcán Tungurahua.....	11
Tabla 3 Relación general de consistencia y esfuerzo de compresión simple de los suelos.....	13
Tabla 4 Resumen porcentual de componentes mineralógicos de distintos estudios de ceniza volcánica.....	15
Tabla 5. Mineralogía de la ceniza volcánica del volcán Tungurahua	17
Tabla 6 Mineralogía de la ceniza volcánica del volcán Cotopaxi.....	19
Tabla 7 Mineralogía de la ceniza volcánica del volcán Guagua Pichincha	21
Tabla 8 Clasificación de la cal de acuerdo con su composición química	24
Tabla 9 Resumen porcentual de la composición química aproximada de los cementos y los requisitos químicos según la NTE INEN 152	25
Tabla 10 Propiedades físicas para el Hidróxido de sodio.....	26
Tabla 11 Cemento requerido en volumen para la estabilización efectiva de varios suelos	29
Tabla 12 Coordenadas geográficas de las muestras de ceniza de cada volcán.....	32
Tabla 13 Dosificaciones y nomenclatura de mezclas de puzolana con activadores.....	42
Tabla 14 Tamaño de abertura de tamices en milímetros	43
Tabla 15 Granulometría por tamizado de la muestra de suelo natural.....	45
Tabla 16 Clasificación SUCS de la muestra de suelo natural	52
Tabla 17 Resumen de método A, B y C para Proctor Estándar	53
Tabla 18 Densidad seca máxima y humedad óptima de la muestra de suelo natural.....	57
Tabla 19 Deformación unitaria y esfuerzo máximo de la muestra de suelo natural	63
Tabla 20 Ensayo de corte directo de la muestra de suelo natural.....	72

Tabla 21 Resultados del ensayo de difracción de rayos X de las cenizas del volcán Cotopaxi, Tungurahua y Guagua Pichincha.....	75
Tabla 22 Densidad seca máxima y humedad óptima de muestras estabilizadas con ceniza del volcán Cotopaxi	79
Tabla 23 Densidad seca máxima y humedad óptima de muestras estabilizadas con ceniza del volcán Tungurahua	80
Tabla 24 Densidad seca máxima y humedad óptima de muestras estabilizadas con ceniza del volcán Guagua Pichincha	80
Tabla 25 Deformación unitaria máxima y esfuerzo máximo de las muestras estabilizadas con ceniza del volcán Cotopaxi al 3% curadas por 28 días	81
Tabla 26 Deformación unitaria máxima y esfuerzo máximo de las muestras estabilizadas con ceniza del volcán Cotopaxi al 6% curadas por 28 días	82
Tabla 27 Deformación unitaria máxima y esfuerzo máximo de las muestras estabilizadas con ceniza del volcán Cotopaxi al 3% curadas por 56 días	83
Tabla 28 Deformación unitaria máxima y esfuerzo máximo de las muestras estabilizadas con ceniza del volcán Cotopaxi al 6% curadas por 56 días	84
Tabla 29 Deformación unitaria máxima y esfuerzo máximo de las muestras estabilizadas con ceniza del volcán Tungurahua al 3% curadas por 28 días	85
Tabla 30 Deformación unitaria máxima y esfuerzo máximo de las muestras estabilizadas con ceniza del volcán Tungurahua al 6% curadas por 28 días	86
Tabla 31 Deformación unitaria máxima y esfuerzo máximo de las muestras estabilizadas con ceniza del volcán Tungurahua al 3% curadas por 56 días	87
Tabla 32 Deformación unitaria máxima y esfuerzo máximo de las muestras estabilizadas con ceniza del volcán Tungurahua al 6% curadas por 56 días	88

Tabla 33 Deformación unitaria máxima y esfuerzo máximo de las muestras estabilizadas con ceniza del volcán Guagua Pichincha al 3% curadas por 28 días.....	89
Tabla 34 Deformación unitaria máxima y esfuerzo máximo de las muestras estabilizadas con ceniza del volcán Guagua Pichincha al 6% curadas por 28 días.....	90
Tabla 35 Deformación unitaria máxima y esfuerzo máximo de las muestras estabilizadas con ceniza del volcán Guagua Pichincha al 3% curadas por 56 días.....	91
Tabla 36 Deformación unitaria máxima y esfuerzo máximo de las muestras estabilizadas con ceniza del volcán Guagua Pichincha al 6% curadas por 56 días.....	92
Tabla 37 Deformación unitaria máxima y esfuerzo máximo de las muestras patrón	93
Tabla 38 Cohesión y ángulo de fricción de las muestras estabilizadas con ceniza del volcán Cotopaxi.....	94
Tabla 39 Cohesión y ángulo de fricción de las muestras estabilizadas con ceniza del volcán Tungurahua.....	94
Tabla 40 Cohesión y ángulo de fricción de las muestras estabilizadas con ceniza del volcán Guagua Pichincha.....	95
Tabla 41 Cohesión y ángulo de fricción de las muestras patrón	95
Tabla 42 Resultados del ensayo de difracción de rayos X del suelo estabilizado con cemento y cal.....	98
Tabla 43 Resultados de Proctor Estándar de muestras estabilizadas con cal.....	102
Tabla 44 Resultados de Proctor Estándar de muestras estabilizadas con cemento	103
Tabla 45 Resultados de Proctor Estándar de muestras estabilizadas con hidróxido de sodio	104
Tabla 46 Resultados de compresión simple en suelos de muestras estabilizadas con cal	105
Tabla 47 Resultados de compresión simple en suelos de muestras estabilizadas con cemento	106

Tabla 48 Resultados de compresión simple en suelos de muestras estabilizadas con hidróxido de sodio	107
Tabla 49 Resultados de corte directo en suelos de muestras estabilizadas con cemento	108
Tabla 50 Resultados de corte directo en suelos de muestras estabilizadas con cal	109
Tabla 51 Resultados de corte directo en suelos de muestras estabilizadas con hidróxido de sodio	110
Tabla 52 Resultados de termogravimetría para las cenizas volcánicas	110
Tabla 53 Resultados de termogravimetría para las muestras patrón	111
Tabla 54 Resultados del ensayo de Difracción de Rayos X para las cenizas volcánicas	112
Tabla 55 Resultados del ensayo de Difracción de Rayos X para las muestras patrón	112
Tabla 56 Resistencias últimas del ensayo a compresión simple máximas para cada volcán con adición de 3% de activador	128
Tabla 57 Resistencia al corte directo y sus parámetros para cada muestra estabilizada con ceniza volcánica y cemento como activador.....	141
Tabla 58 Resistencia al corte directo y sus parámetros para cada muestra estabilizada con ceniza volcánica y cal como activador	142
Tabla 59 Resistencia al corte directo y sus parámetros para cada muestra estabilizada con ceniza volcánica e hidróxido de sodio como activador.....	143
Tabla 60 Resistencias cortantes mayores para cada volcán y activador.	144

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del volcán Cotopaxi	6
Figura 2. Capas de escoria, pómez y ceniza correspondiente a lluvias de ceniza y piroclastos de erupciones del Cotopaxi.....	7
Figura 3. Ubicación del volcán Guagua Pichincha	8
Figura 4. Ubicación del volcán Tungurahua	9
Figura 5. Esquema geológico simplificado del volcán Tungurahua.....	10
Figura 6. Distribución general de las principales cenizas volcánicas – Valle interandino – Ecuador	15
Figura 7. Actividad tipo fuente de lava, proyección de bloques incandescentes con alcance de 2 km de altura SNC	16
Figura 8. Isópacas de ceniza acumulada. Distribución de los depósitos de ceniza en dos ejes; NO y O-SO producto del régimen local de los vientos.....	16
Figura 9. Esquema de una explosión volcánica con bombas volcánicas y una columna de ceniza saliendo del cráter del Cotopaxi.....	17
Figura 10. Mapa preliminar del depósito de caída de ceniza asociado a la actividad eruptiva del volcán Cotopaxi entre el 4 y el 11 de septiembre de 2015	18
Figura 11. Erupción del volcán Guagua Pichincha del 7 de octubre de 1999 a las 7 am.....	20
Figura 12. Mapa de isópacas proveniente de las erupciones del volcán Guagua Pichincha.....	21
Figura 13. Ubicación de la muestra a estabilizar.....	31
Figura 14. Lugar de extracción del suelo (vía Panamericana Norte).....	32
Figura 15. Vista en Google Maps de los lugares de extracción de la ceniza volcánica (Naranja: Volcán Guagua Pichincha; Azul: Volcán Cotopaxi; Amarillo: Volcán Tungurahua).....	33
Figura 16. Lugar de extracción de la ceniza del volcán Tungurahua, depósito lahárico por la quebrada Achupashal.....	34
Figura 17. Lugar de extracción de la ceniza del volcán Cotopaxi. Depósito en el sector de San Felipe – Latacunga.....	35

Figura 18. Lugar de extracción de la ceniza del volcán Guagua Pichincha. Depósito en zona de ascenso al páramo del volcán.....	35
Figura 19. Muestra seca de ceniza del volcán Cotopaxi.	36
Figura 20. Muestra seca de ceniza del volcán Guagua Pichincha	36
Figura 21. Muestra seca de ceniza del volcán Tungurahua	37
Figura 22. Proceso de molienda para las cenizas (volcán Tungurahua).....	37
Figura 23. Proceso de tamizado para las cenizas (volcán Tungurahua).....	38
Figura 24. Material fino (ceniza) obtenido de la muestra del volcán Guagua Pichincha.....	38
Figura 25. Material fino (ceniza) obtenido de la muestra del volcán Cotopaxi	39
Figura 26. Material fino (ceniza) obtenido de la muestra del volcán Tungurahua.....	39
Figura 27. a) Hidróxido de sodio sólido b) Agua destilada	40
Figura 28. Preparación de solución de Hidróxido de Sodio con concentración de 10 M.....	41
Figura 29. Tamices para granulometría	44
Figura 30. Curva Granulométrica	44
Figura 31. Estados básicos del suelo de acuerdo con el contenido de humedad	46
Figura 32. Esfera de suelo natural para ensayo de límite plástico	47
Figura 33. Cilindros de suelo natural para ensayo de límite plástico.....	48
Figura 34. Suelo natural enrazado en copa de Casagrande	49
Figura 35. Suelo ranurado en copa de Casagrande.....	49
Figura 36. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)	51
Figura 37. Carta de Plasticidad	52
Figura 38. Suelo natural seco que pasa el tamiz #4.....	54
Figura 39. Molde para Proctor Estándar (método A).....	54
Figura 40. Equipos para ensayo de Proctor Estándar (método A)	55
Figura 41. Suelo natural mezclado con agua para ensayo de Proctor Estándar (método A)	55
Figura 42. Patrón de golpes uniformes en superficie de cada capa para ensayo de Proctor Estándar (método A)	56

Figura 43. Ensayo de compactación Proctor Estándar (método A).....	56
Figura 44. Enrazado de muestra natural para ensayo de Proctor Estándar (método A)	57
Figura 45. Equipo de prueba de Compresión no confinada (Resistencia a compresión simple)	58
Figura 46. Circulo de Mohr de la prueba de compresión simple	59
Figura 47. Remoldeo de muestra para ensayo de compresión Simple	60
Figura 48. Muestra de suelo remoldeada para ensayo de compresión Simple	60
Figura 49. Ensayo de resistencia a la compresión simple.....	61
Figura 50. Evidencia fotográfica de la muestra antes y después de realizar el ensayo de compresión simple.	62
Figura 51. Envolvente de falla de Mohr-Coulomb	64
Figura 52. Suelo natural seco para ensayo de corte directo	65
Figura 53. Suelo mezclado en humedad óptima para ensayo de corte directo	66
Figura 54. Remoldeo de muestra para ensayo de corte directo.....	66
Figura 55. Muestra de suelo remoldeada para ensayo de corte directo.....	67
Figura 56. Tallado de muestra para ensayo de corte directo	67
Figura 57. Colocación de muestra en máquina de corte directo	68
Figura 58. Máquina de corte directo ensamblada con muestra.....	68
Figura 59. Falla en muestra por ensayo de corte directo	69
Figura 60. Ensayo de Corte Directo en suelo natural con esfuerzo normal de 0.5 kg/cm ²	69
Figura 61. Ensayo de Corte Directo en suelo natural con esfuerzo normal de 1.0 kg/cm ²	70
Figura 62. Ensayo de Corte Directo en suelo natural con esfuerzo normal de 2.0 kg/cm ²	70
Figura 63. Envolvente de falla de Mohr-Coulomb del ensayo de corte directo en el suelo natural	71
Figura 64. Difracción de rayos X por medio de un cristal	73
Figura 65. Difractograma de la ceniza del volcán Tungurahua	74
Figura 66. Difractograma de la ceniza del volcán Cotopaxi	74

Figura 67. Difractograma de la ceniza del volcán Guagua Pichincha	75
Figura 68. Equipo Perkin Elmer STA 8000.....	77
Figura 69. Termograma de la ceniza del volcán Tungurahua	77
Figura 70. Termograma de la ceniza del volcán Cotopaxi	78
Figura 71. Termograma de la ceniza del volcán Guagua Pichincha	78
Figura 72. Difractograma de la muestra estabilizada con cal al 2%	96
Figura 73. Difractograma de la muestra estabilizada con cal al 3%	96
Figura 74. Difractograma de la muestra estabilizada con cemento al 2%.....	97
Figura 75. Difractograma de la muestra estabilizada con cemento al 3%.....	97
Figura 76. Termograma de la muestra estabilizada con cal al 2%.....	98
Figura 77. Termograma de la muestra estabilizada con cal al 3%.....	99
Figura 78. Termograma de la muestra estabilizada con cemento al 2%.....	99
Figura 79. Termograma de la muestra estabilizada con cemento al 3%.....	100
Figura 80. Comparación de la densidad seca máxima del suelo estabilizado con cemento al 2% y 3%.....	113
Figura 81. Comparación de la humedad óptima del suelo estabilizado con cemento al 2% y 3%.....	113
Figura 82. Porcentaje de aumento de la densidad seca máxima del suelo estabilizado con cemento al 2% y 3%.....	114
Figura 83. Comparación de la densidad seca máxima del suelo estabilizado con cal al 2% y 3%	115
Figura 84. Comparación de la humedad óptima del suelo estabilizado con cal al 2% y 3%.....	115
Figura 85. Porcentaje de variación de la densidad seca máxima del suelo estabilizado con cal al 2% y 3%	116
Figura 86. Comparación de la densidad seca máxima del suelo estabilizado con hidróxido de sodio al 2% y 3%.....	117
Figura 87. Comparación de la humedad óptima del suelo estabilizado con hidróxido de sodio al 2% y 3%.....	117
Figura 88. Porcentaje de aumento de la densidad seca máxima del suelo estabilizado con hidróxido de sodio al 2% y 3%.....	118
Figura 89. Esfuerzo máximo a compresión simple del suelo estabilizado con cemento al 2% y 3%.....	119

Figura 90. Porcentaje de aumento del esfuerzo máximo a compresión simple del suelo estabilizado con cemento al 2% y 3% con respecto a las muestras patrón SN-Ce2 y SN-Ce3	121
Figura 91. Porcentaje de aumento del esfuerzo máximo a compresión simple del suelo estabilizado con cemento al 2% y 3% con respecto a la muestra natural SN	122
Figura 92. Esfuerzo máximo del suelo estabilizado con cal al 2% y 3%	123
Figura 93. Porcentaje de aumento del esfuerzo máximo a compresión simple del suelo estabilizado con cal al 2% y 3% con respecto a las muestras patrón SN-Ca2 y SN-Ca3	124
Figura 94. Porcentaje de aumento del esfuerzo máximo a compresión simple del suelo estabilizado con cal al 2% y 3% con respecto a la muestra natural SN.	125
Figura 95. Esfuerzo máximo a compresión simple del suelo estabilizado con hidróxido de sodio al 2% y 3%.....	126
Figura 96. Porcentaje de aumento del esfuerzo máximo a compresión simple del suelo estabilizado con cal al 2% y 3% con respecto a la muestra natural SN.	127
Figura 97. Cohesión del suelo estabilizado con cemento al 2% y 3%.....	129
Figura 98. Porcentaje de aumento de la cohesión del suelo estabilizado con cemento al 2% y 3% con respecto a las muestras patrón SN-Ce2 y SN-Ce3	130
Figura 99. Porcentaje de aumento de la cohesión del suelo estabilizado con cemento al 2% y 3% con respecto al suelo natural SN	131
Figura 100. Ángulo de fricción del suelo estabilizado con cemento al 2% y 3%.	132
Figura 101. Porcentaje de aumento del ángulo de fricción del suelo estabilizado con cemento al 2% y 3% respecto a las muestras patrón SN-Ce2 y SN-Ce3	132
Figura 102. Porcentaje de aumento del ángulo de fricción del suelo estabilizado con cemento al 2% y 3% respecto al suelo natural SN.	133
Figura 103. Cohesión del suelo estabilizado con cal al 2% y 3%.....	134

Figura 104. Porcentaje de aumento de la cohesión del suelo estabilizado con cal al 2% y 3% respecto a muestras patrón.....	134
Figura 105. Porcentaje de aumento de la cohesión del suelo estabilizado con cal al 2% y 3% respecto a muestras patrón.....	135
Figura 106. Ángulo de fricción del suelo estabilizado con cal al 2% y 3%.	136
Figura 107. Porcentaje de aumento del ángulo de fricción del suelo estabilizado con cal al 2% y 3% con respecto a las muestras patrón SN-Ca2 y SN-Ca3.	136
Figura 108. Porcentaje de aumento del ángulo de fricción del suelo estabilizado con cal al 2% y 3% con respecto al suelo natural SN.....	137
Figura 109. Cohesión del suelo estabilizado con hidróxido de sodio al 2% y 3%.	138
Figura 110. Porcentaje de aumento de la cohesión del suelo estabilizado con hidróxido de sodio al 2% y 3% con respecto al suelo natural SN.....	138
Figura 111. Ángulo de fricción del suelo estabilizado con hidróxido de sodio al 2% y 3%.	139
Figura 112. Porcentaje de aumento del ángulo de fricción del suelo estabilizado con hidróxido de sodio al 2% y 3% con respecto al suelo natural.	140
Figura 113. Curvas de termogravimetría sobrepuestas de las cenizas volcánicas.....	145
Figura 114. Porcentajes de pérdida de masa de los compuestos por termogravimetría en las muestras patrón.....	146
Figura 115. Derivadas de curva de termogravimetría de muestras patrón sobrepuestas (SN-Ce2, SN-Ce3, SN-Ca2 y SN-Ca3).....	147

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación para el cálculo de número de moles	40
Ecuación 2. Reemplazo de variables	41
Ecuación 3. Coeficiente de uniformidad	45
Ecuación 4. Coeficiente de gradación	45
Ecuación 5. Índice de plasticidad	50
Ecuación 6. Deformación axial unitaria	62
Ecuación 7. Área transversal corregida.....	62
Ecuación 8. Esfuerzo principal mayor	63
Ecuación 9. Resistencia cortante	64
Ecuación 10. Esfuerzo cortante.....	70
Ecuación 11. Esfuerzo normal.....	71
Ecuación 12. Ecuación de Bragg	73

RESUMEN

El presente trabajo de titulación tiene como objetivo estabilizar suelos de consistencia tipo blanda con resistencia a compresión simple menor a 80kN/m², adicionando puzolanas de tres volcanes del Ecuador: Cotopaxi (VC), Guagua Pichincha (VP) y Tungurahua (VT) junto con tres activadores alcalinos (cemento, cal e hidróxido de sodio) en varias proporciones. Para la estabilización se emplea cenizas volcánicas, dado su gran potencial como material cementante, a pesar de que actualmente éstas son poco explotadas en el campo de estabilización de suelos.

Para la parte experimental de este estudio se llevaron a cabo ensayos físicos y mecánicos en el laboratorio, tales como: compactación Proctor estándar, resistencia a compresión simple (28 y 56 días de curado) y corte directo; dichas pruebas fueron realizadas en el suelo natural, muestras patrón y en los especímenes estabilizados con 3% y 6% de ceniza volcánica respecto al peso del suelo en humedad óptima, combinadas con el 2% y 3% de cada activador. Además, se realizaron los ensayos de difracción de rayos X (DRX) y termogravimetría (TGA) en las cenizas volcánicas y muestras patrón, para obtener una caracterización y cuantificación mineralógica.

Finalmente, con los resultados obtenidos, se logra comprobar que las cenizas volcánicas con activación alcalina pueden mejorar las propiedades mecánicas y físicas del suelo, aumentando notablemente sus resistencias a compresión simple y corte directo, en comparación al suelo natural.

Palabras clave: Ceniza volcánica, Resistencia a compresión simple, Resistencia a corte directo, Activador puzolánico, Porcentaje de adición.

ABSTRACT

The purpose of this undergraduate final project is to stabilize soft soils (with simple compressive strength less than 80kN/m²), by adding pozzolans from three different volcanoes in Ecuador: Cotopaxi (VC), Guagua Pichincha (VP) and Tungurahua (VT); and three alkaline activators (cement, quicklime and sodium hydroxide) in several proportions. To stabilize the soils, volcanic ashes are used due to its great potential as a cementing material, even though nowadays, these types of ashes are rarely used in the field of soil stabilization.

For the experimental part of this study, physical and mechanical tests were carried out in the laboratory, such as: standard Proctor compaction, simple compression resistance (Curing periods of 28 and 56 days) and direct shear. Those tests were conducted on natural soil, standard samples and on specimens stabilized with 3% and 6% of volcanic ash considering the soil weight in optimal humidity, combined with 2% and 3% of each activator. In addition, X-ray diffraction analysis (XRD) and thermogravimetric analysis (TGA) were performed on the volcanic ash and standard samples, to obtain a mineralogical characterization and quantification.

Finally, based on the results, it is verified that the volcanic ashes with alkaline activation can improve the mechanical and physical properties of the soil, as they considerably increase its resistance to simple compression and direct shear, compared to the natural soil.

Keywords: Volcanic ash, Simple compressive strength, Direct shear strength, Pozzolanic activator, Percentage improvement.

PRESENTACIÓN

La presente investigación está compuesta de cinco capítulos con sus respectivas referencias bibliográficas y anexos. A continuación, se presenta el desarrollo de cada capítulo:

Capítulo 1: Se presenta las generalidades de este estudio: introducción, objetivos, justificaciones y el alcance respecto al uso de puzolanas volcánicas con activadores alcalinos para la estabilización de suelos. Asimismo, se encuentra la ubicación de la muestra de suelo y una descripción del pasado eruptivo de los volcanes utilizados en la investigación.

Capítulo 2: Se expone el fundamento teórico necesario para respaldar esta investigación referente a los componentes usados; la consistencia del suelo, con una clasificación en base a la resistencia a compresión simple; las cenizas volcánicas y los activadores puzolánicos, con la descripción de sus propiedades químicas y composiciones mineralógicas. Además, se habla de la estabilización de suelos y los distintos métodos tradicionales.

Capítulo 3: En este apartado se describen las zonas en las que se recolectaron las puzolanas y el suelo natural, con el proceso de preparación dado a cada componente. De igual manera, se presentan las dosificaciones usadas en el estudio con su respectiva nomenclatura. Finalmente se detallan los ensayos físicos, mecánicos y mineralógicos llevados a cabo en el suelo natural y las muestras estabilizadas.

Capítulo 4: Se expone los resultados de los ensayos realizados a la muestra natural y especímenes estabilizados; seguido de su respectivo análisis, de manera que se pueda evidenciar la influencia de la ceniza volcánica junto con los activadores alcalinos en el suelo, verificando así el mejoramiento de sus propiedades físicas y mecánicas.

Capítulo 5: Se emiten las conclusiones resultantes de los análisis realizados en el capítulo anterior, además de las recomendaciones que derivan del presente estudio.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

El cemento portland es uno de los materiales de construcción más usados a nivel mundial, siendo su gran volumen de producción generador de gases contaminantes a la atmósfera (CO_2 , SO_2 , NO_x) (Syahril et al., 2020) donde el dióxido de carbono es el que tiene mayores repercusiones negativas, ya que contribuye entre el 5 y 7% de la cantidad total a nivel mundial. Las emisiones de este gas están asociadas a dos procesos dentro de la fabricación del cemento, un 60% de CO_2 químico es generado debido al proceso de clinkerización, resultante de la calcinación del carbonato de calcio y de un material silicio; y un 40% por las emisiones térmicas en la combustión de carbón (Torres-Carrasco & Puertas, 2017), cabe mencionar que en este proceso, actualmente algunas industrias como Holcim, están implementando el uso de combustibles alternos de manera que se reduzca la producción de CO_2 en al menos un 30% (HOLCIM, 2021).

Ante esta problemática, una de las alternativas es reducir la utilización de cemento hidráulico, por lo que ha surgido la necesidad de desarrollar o encontrar nuevos materiales cementicios, artificiales o naturales (Lemougna et al., 2011). En las últimas décadas se ha presentado interés en puzolanas naturales tales como ceniza volcánica o arcillas, en zonas donde estos materiales abundan y puedan ser aprovechados (Djon Li Ndjock et al., 2017).

En Ecuador, por su ubicación geográfica, se ha dado lugar a la formación de una larga serie de volcanes con una permanente actividad (Moreta, 2018), generando depósitos de ceniza por su pasado eruptivo. Esta ceniza es considerada como una puzolana natural, debido a su alto contenido de sílice, alúmina y óxidos de hierro (Djon Li Ndjock et al., 2017), cuyo uso requiere de una activación alcalina que disuelva los aluminosilicatos, formando una estructura sólida (Lemougna et al., 2014).

En el presente estudio, se plantea el mejoramiento de suelos de baja resistencia a compresión simple (menores a 80 kN/m^2), en condiciones de humedad óptima al 95% de Proctor estándar, mediante la incorporación de cenizas volcánicas y activadores puzolánicos.

Para la estabilización se trabajará con la ceniza volcánica en relación del 3% y 6% en peso del suelo en condiciones de humedad óptima; combinadas con el 2% y 3% en peso del suelo, de cada activador: cemento, cal e hidróxido de sodio. De manera que se pueda obtener una opción viable para la optimización de este recurso natural.

A diferencia de trabajos previos, tales como (Licuy & Román, 2020) en donde se estabilizaron arcillas expansivas, con ceniza del volcán Tungurahua junto con cascarilla de arroz, y (Buitrón & Enríquez, 2018) investigación en la cual se estabilizó arcillas expansivas únicamente con ceniza volcánica del Tungurahua; en el presente estudio se tratarán suelos de baja resistencia, analizando su estabilización con cenizas de los volcanes Tungurahua, Cotopaxi y Guagua Pichincha, junto con los métodos de activación descritos previamente, además que se verificará el incremento de la resistencia del suelo mediante ensayos a compresión simple.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Estabilizar suelos de resistencia menores a 80 kN/m^2 utilizando 3 tipos de alcalinizantes y diferentes proporciones de cenizas volcánicas, de forma que se tengan un mejoramiento en las características mecánicas y mineralógicas del suelo.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el comportamiento mecánico del suelo blando estabilizado con 3% y 6% de ceniza volcánica en peso respecto al peso del suelo en humedad óptima; combinadas con el 2% y 3% del peso del suelo, de cada activador descrito: cal, cemento e hidróxido de sodio.

- Analizar los difractogramas de rayos X y los termogramas de manera que se pueda deducir las características comunes y diferentes, entorno a las cenizas volcánicas.
- Comparar los resultados entre las muestras estabilizadas para seleccionar aquella que presente el mejor comportamiento mecánico.
- Analizar la mejora de la resistencia a compresión simple y corte directo de las muestras estabilizadas para cada ceniza volcánica.

1.3. JUSTIFICACIÓN

1.3.1. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

En investigaciones previas, la ceniza volcánica ha sido probada como materia prima en la síntesis de geopolímeros, dando lugar a pastas de cemento con resistencias a la compresión entre 23 y 50 MPa (Tchakoute et al., 2013). Además, se ha evidenciado que contribuye con el mejoramiento de las características técnicas del suelo, pues reduce los índices de plasticidad y aumenta la resistencia a la compresión y el valor máximo de la cohesión (Syahril et al., 2020)

Esta investigación se realizará con el propósito de aportar en el estudio de mejoramiento de suelos blandos (resistencias a compresión simple menores a 80 kN/m²), de manera que se obtenga un material cementante ecoamigable con una dosificación optimizada funcionalmente, aprovechando los recursos naturales que abundan en el Ecuador, tal como es la ceniza volcánica.

1.3.2. JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA

El desarrollo de esta investigación se realizó a partir de la determinación de la reactividad puzolánica de diferentes cenizas volcánicas y luego su uso en muestras de suelos con resistencias a compresión simple menores a 80 kN/m², buscando mejorar su desempeño en resistencia a corte y esfuerzo axial.

Bajo este precedente, se ha realizado una comparación de estas propiedades mecánicas, por ejemplo, la relación puzolánica ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$), a partir del análisis químico, mineralógico y termogravimétrico del material natural de tipo aluminosilicato, de modo que permitió establecer un rango de porcentajes para los

activadores alcalinos que serán usados (cemento, cal, hidróxido de sodio) con las cenizas volcánicas (J. N. Y. Djobo et al., 2016).

1.3.3. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA

En Ecuador, debido a que se tiene gran cantidad de depósito de cenizas generada por la historia eruptiva de los volcanes a ser utilizados en esta investigación, es posible encontrar una aplicación para este recurso dentro del sector de la construcción, ya que no requiere un proceso industrializado complejo y se ha demostrado que tiene altas propiedades cementantes si se lo activa correctamente, pudiendo éste ser una alternativa ecoamigable para el mejoramiento de suelos de baja resistencia (Syahril et al., 2020).

Si bien es cierto, las características macroscópicas (SUCS, corte directo y resistencia a compresión simple) que presenta un suelo estabilizado son importantes al momento de seleccionar el método más efectivo, no se debe dejar de lado un análisis microscópico, mediante la aplicación de ensayos tales como difracción de rayos X y termogravimetría, con los que se verifica la disolución de la fase amorfa del aluminosilicato y la formación de una nueva en los geopolímeros inorgánicos (Y. J. N. Djobo et al., 2016), siendo estos los cambios mineralógicos que sufre el suelo debido a las reacciones (Murmu et al., 2019).

1.4. ALCANCE

En el presente estudio se analiza la estabilización de suelos con resistencias a la compresión simple menores a 80 kN/m², mediante la adición de puzolanas de origen natural. Se realizará la estabilización a partir de la incorporación de cenizas volcánicas de los volcanes: Tungurahua, Guagua Pichincha y Cotopaxi, en porcentajes definidos de 3% y 6% del peso, respecto al peso del suelo en humedad óptima; junto con activadores puzolánicos tales como: cal, cemento e hidróxido de sodio, con 2% y 3% en peso del suelo en humedad óptima.

Para evaluar la eficiencia de la estabilización se comparará las resistencias a la compresión simple y corte directo, entre el suelo natural, el suelo con activadores puzolánicos y el suelo estabilizado (cenizas y activadores).

1.5. ORIGEN DE LA MUESTRA DE SUELO

El suelo, caracterizado como “blando”, fue muestreado en la zona baja de los taludes de la vía a Guayllabamba, del cual se realizó una previa verificación de su resistencia a compresión simple, siendo ésta menor a 80 kN/m².

1.5.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El sitio del cual se extrajo el suelo se encuentra ubicado a 40 minutos de la ciudad de Quito, en la vía a Guayllabamba, sentido sur-norte. En la Tabla 1 se muestra la ubicación geográfica.

Tabla 1

Coordenadas utm punto de muestreo de suelos

Muestra	LONGITUD	LATITUD
1	791106	9991593

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

1.6. ORIGEN DE LAS MUESTRAS DE CENIZAS VOLCÁNICAS

Los volcanes presentes en el Ecuador se deben a que éste se encuentra en el llamado “cinturón de fuego”, mismo que se refiere a una zona de subducción en el fondo del Océano Pacífico (J. Pennec, 2018), dando como resultado la presencia de numerosos volcanes formados desde el Plio-Cuaternario, algunos de los cuales se encuentran activos (Pichincha, Cotopaxi, Reventador, Tungurahua) y otros considerados como potencialmente activos (Ordóñez et al., 2011).

Para esta investigación se utilizó las cenizas procedentes de tres volcanes de la región interandina como lo son: Cotopaxi (VC), Guagua Pichincha (VP) y Tungurahua (VT).

1.6.1. VOLCÁN COTOPAXI

El volcán Cotopaxi se encuentra ubicado en la Cordillera Oriental de los Andes del Ecuador, a 60 km al sureste de Quito y 35 km al noroeste de Latacunga, con una altitud de 5897 m.s.n.m. Este volcán es de carácter bimodal, puesto que ha producido principalmente erupciones de tipo andesíticas, erupciones de intensidad leve a moderada, y riolíticas, erupciones de magnitud y extensión alta que han afectado áreas de relevancia a lo largo de la historia (Francou et al., 2005).

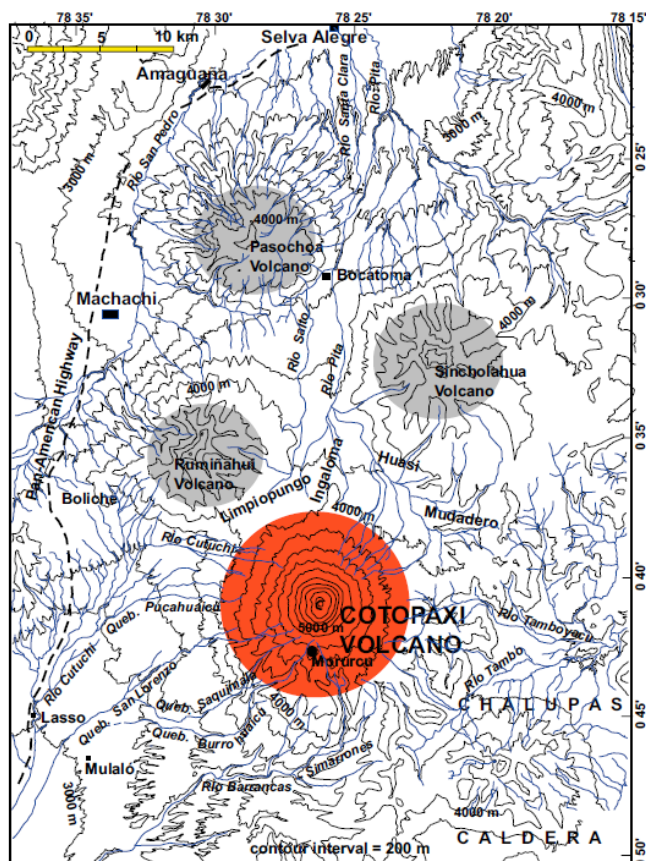


Figura 1. Ubicación del volcán Cotopaxi

Fuente: (M. Hall & Mothes, 2007)

La historia de la actividad volcánica que tiene el Cotopaxi es relativamente larga, teniendo los depósitos más antiguos con más de 500 ka de edad. Estos corresponden a un antiguo complejo volcánico bautizado como “Cotopaxi I”, puesto que, en ese tiempo, el volcán conocido hoy en día era muy diferente; estaba formado por grupos de domos de lava riolítica alineados y no por un alto edificio cónico. Las erupciones de este complejo fueron muy explosivas, formando flujos piroclásticos que llegaron hasta 17 km al suroccidente del volcán, dando como resultado caídas de cenizas y pómez en zonas a más de 30 km al sur (Samaniego et al., 2003).

Desde 1534, el volcán ha experimentado, al menos, 13 erupciones significativas, correspondientes a cinco períodos: 1532-1534, 1742-1744, 1766-1768, 1853-1854 y 1877-1880. Dichas erupciones fueron de carácter andesítico, produciendo flujos piroclásticos, caída de ceniza y lapilli, flujos de lava y escombros de gran alcance. El volcán Cotopaxi ha sido monitoreado instrumentalmente desde 1977,

presentándose un incremento en los niveles de sismicidad y actividad fumarólica desde el 2001 hasta la fecha actual (M. Hall & Mothes, 2007).

Las lluvias de piroclastos han estado presentes en todos los ciclos eruptivos de los últimos 2000 años. La extensión que alcanzan es importante para la creación de los depósitos de ceniza en los alrededores del volcán. Un ejemplo es la última erupción grande registrada por Luis Sodiro, el 26 de junio de 1877, produciéndose una lluvia de ceniza, que afectó principalmente a poblaciones de Quito y Machachi, donde se generó una capa de aproximadamente 2 cm y 6 mm, respectivamente (Samaniego et al., 2003).

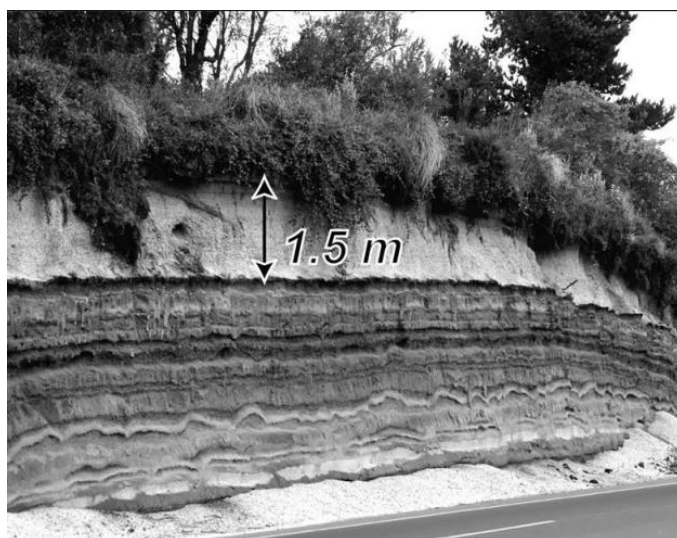


Figura 2. Capas de escoria, pómez y ceniza correspondiente a lluvias de ceniza y piroclastos de erupciones del Cotopaxi.

Foto: P. Mothes

Fuente: (Andrade et al., 2005)

1.6.2. VOLCÁN GUAGUA PICHINCHA

El complejo volcánico Pichincha está conformado por un volcán inactivo conocido como Rucu Pichincha, el cual terminó su actividad volcánica probablemente hace 1 millón de años, y un volcán joven actualmente activo, el Guagua Pichincha. El volcán Guagua Pichincha está ubicado en la Cordillera occidental de los Andes Ecuatorianos, 12 km al oeste de la ciudad de Quito. Debido a su proximidad a la capital, es considerado un volcán peligroso dentro de la Zona Volcánica Norte de los Andes (Robin et al., 2008).

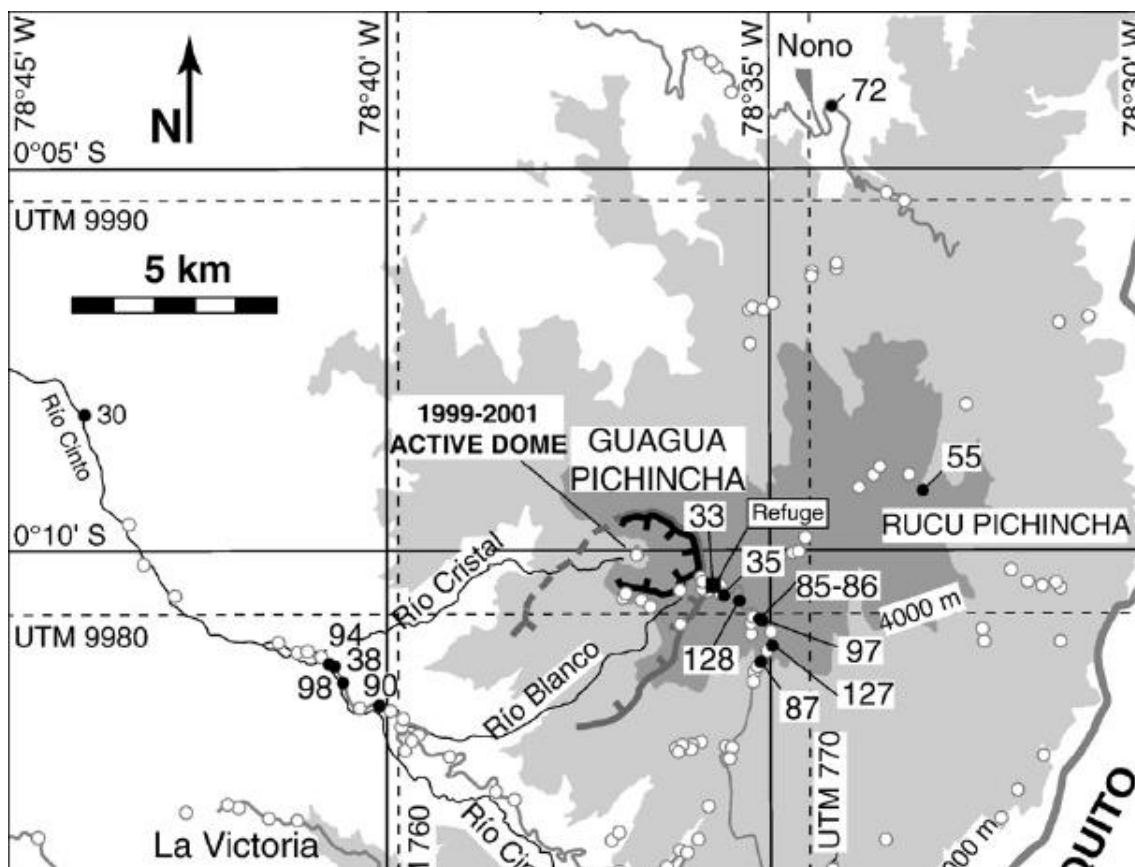


Figura 3. Ubicación del volcán Guagua Pichincha
Fuente: (Robin et al., 2008)

El Guagua Pichincha se desarrolló en tres períodos, durante el Pleistoceno tardío y el Holoceno. El primer período, ocurrido hace aproximadamente 60 000 - 50 000 años, corresponde a la construcción de su basal por flujos de lava de su volcán vecino (Rucu Pichincha) y la formación de un anfiteatro por un colapso sectorial de gran magnitud; el segundo período ocurrió hace 4000 años aproximadamente, en el holoceno medio, formándose un nuevo edificio (Toaza) con flujos de lava y de domos, finalizando con un colapso parcial del edificio; por último, en el Holoceno tardío se registra el tercer período, correspondiente al centro activo que se conoce actualmente, mismo que se dió debido al colapso parcial del edificio mencionado previamente (Pavón & Contreras, 2021).

Según Barberi et al. (1992), el pasado eruptivo del Guagua Pichincha se ha caracterizado por su explosividad registrada durante los últimos 40 000 años, ocurriendo un evento cada ciertos siglos, siendo durante la época prehistórica (hace 3700 y 1000 años) las de mayor magnitud (Manosalvas, 2014b). Además, registros

históricos reportan cuatro erupciones volcánicas desde la conquista española, siendo éstas en 1566, 1575, 1582 y 1660; las cuales, dieron lugar a grandes lluvias de ceniza y flujos piroclásticos en la ciudad de Quito, así como numerosos lahares en los valles de los flancos occidentales del complejo Pichincha (Robin et al., 2008).

1.6.3. VOLCÁN TUNGURAHUA

El Tungurahua, un estrato volcán compuesto, se encuentra ubicado en la cordillera Este de los Andes ecuatorianos, 120 km al sur de Quito, 33 km al sureste de Ambato y 8 km al norte de la ciudad de Baños de Agua Santa. Es uno de los volcanes más activos en el Ecuador y cuenta con una altura de 5023 m.s.n.m (Manosalvas, 2014c).

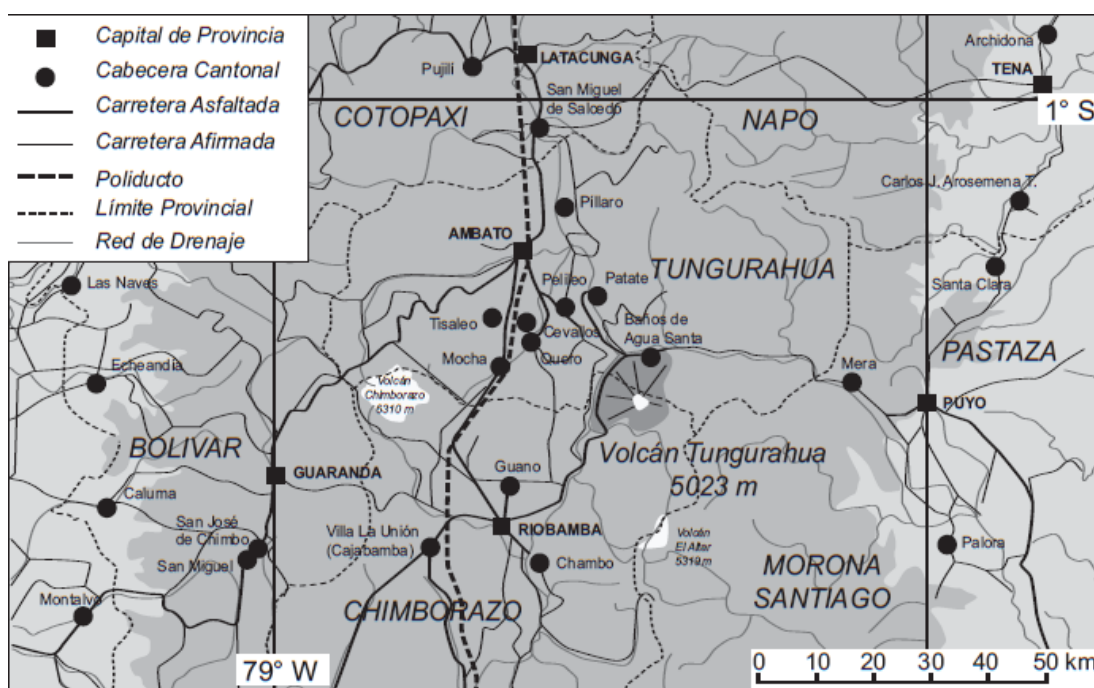


Figura 4. Ubicación del volcán Tungurahua

Fuente: (J.-L. le Penne et al., 2005)

Se formó por tres edificios volcánicos consecutivos: Tungurahua I, II y III; el primero, un estratocono andesítico, experimentó un colapso sectorial seguido de la extrusión de una serie de lava dacítica, y está representado hoy por superficies inclinadas hacia el exterior, no graduadas hasta el cono actual; el segundo, formado por flujos de lava andesítica, fue parcialmente destruido hace aproximadamente 2300 años dejando como efecto depósitos de escombros, y actualmente representado por una serie de flujos de lava en el flanco sur superior; y el tercero,

correspondiente al actual volcán, tuvo dos períodos de construcción: de 2300 a 1400 años antes del presente se generó gran cantidad de magma y flujos piroclásticos, durante este período la composición del magma no tuvo una evolución significativa manteniéndose como andesita básica; por otro lado, durante los últimos 1300 años, los procesos eruptivos han tenido lugar una vez por siglo cuyos patrones han sido similares, comenzando por la caída de lapilli, flujos piroclásticos y finalmente flujos de lava andesítica (M. L. Hall et al., 1999).

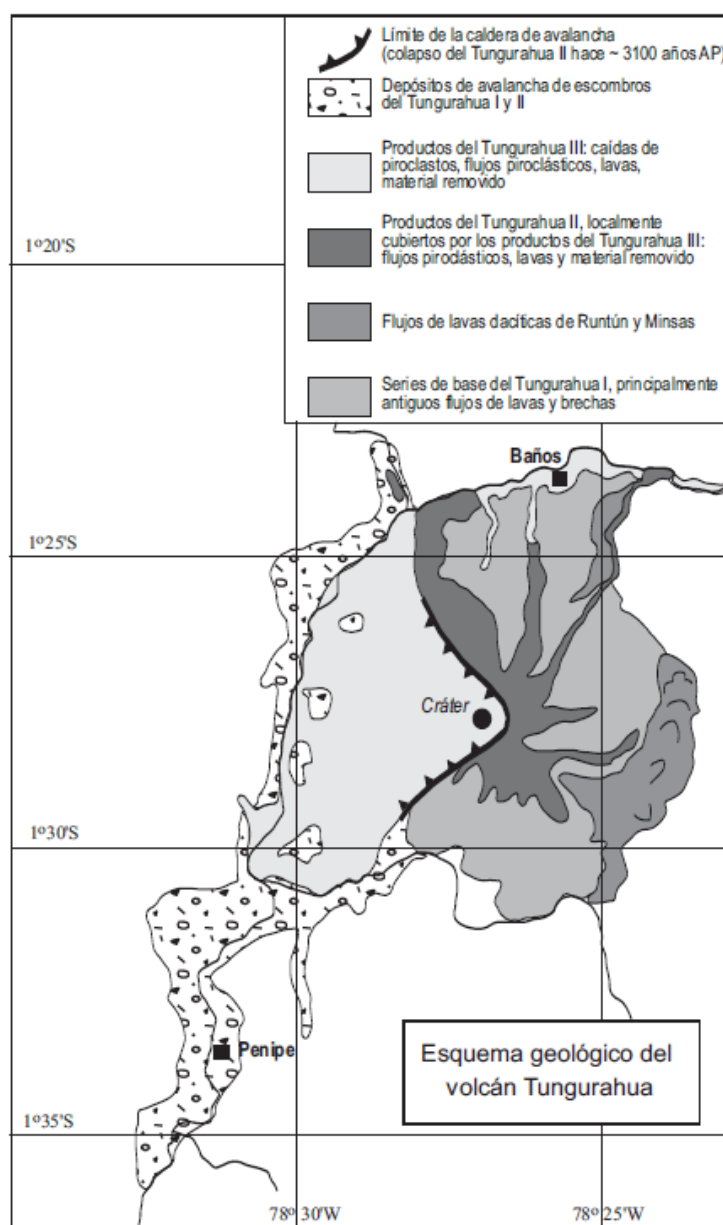


Figura 5. Esquema geológico simplificado del volcán Tungurahua
Fuente: (J.-L. le Penne et al., 2005)

Almeida & Ramón (1991) en su libro Erupciones históricas del Tungurahua, presentan un análisis cronológico basado en documentos históricos que hacen referencia a la actividad del volcán.

Tabla 2

Descripción cronológica de eventos eruptivos del volcán Tungurahua

FECHA	DESCRIPCIÓN
1961	<p>El evento inició con la extrusión de un magma viscoso el cual taponó el cráter, ocasionando un incremento de la presión de gases y una eventual voladura del tapón. Se genera una nube ardiente (nube de porfiríticos y pómez ligeramente fibrosa) y el material viscoso es incorporado a este flujo.</p> <p>La tasa de emisión no fue elevada por lo que la actividad continúa con la emisión explosiva de pómez, formándose un depósito de caída.</p>
1773	<p>En este período la actividad fue importante y se caracteriza por dos fases. Una actividad inicial no intensa en el mes de febrero, produciéndose únicamente emisión de piroclásticos de proyección aérea; y una actividad muy fuerte en abril, que ocasionó un aluvión que inundó la ciudad de Baños de Agua Santa. Emitió varias nubes ardientes generando así depósitos caracterizados por tener fragmentos juveniles, escoriáceos y no vesiculados.</p> <p>Además, hubo una fuerte actividad explosiva casi contemporáneamente con proyección aérea de escoria, dando como resultado la formación de depósitos, siendo el más representativo encontrado en un corte en el cementerio de Baños.</p>
1781 y 1782	<p>En estos años no hubo una actividad eruptiva, únicamente actividad fumarólica.</p>
1886	<p>Se presentó actividad fumarólica intensa con tres meses de anticipación, dando el 11 de enero de 1886 el inicio de la actividad volcánica, con una notable explosión (freática o freatomagmática) y arrojando los materiales que taponaban el cráter. Estos primeros eventos descendieron por casi todas las quebradas que rodean al volcán.</p> <p>Tanto los depósitos de nube ardiente como los de los flujos piroclásticos, se caracterizan por contener fragmentos de magma juvenil (escorias y pómez bandeados). La emisión de estos flujos fue continua hasta el 16 de enero cubriendo una extensa zona en el poblado de Puela.</p>
	<p>Este período eruptivo fue relativamente largo, iniciando con actividad fumarólica a finales de febrero del 1916. La erupción sucedió el 3 de marzo, caracterizada por una emisión explosiva de piroclastos y produciéndose flujos de lodo, que descendieron hasta el río Pastaza. Esta fase explosiva continuó hasta los últimos días de 1917.</p>

1916 - 1918	En enero de 1918 hubo explosiones fuertes generando escoria de aproximadamente 2cm de diámetro, que cayó en el pueblo de Mocha. En abril se tuvo una erupción que emitió nubes ardientes represando a los ríos Chambo y Pastaza. En mayo hubo otra erupción efusiva donde el flujo de lava no llegó a la base del cono. Y por último en noviembre sucede la última etapa eruptiva emitiéndose una nube ardiente y piroclastos de proyección aérea, represando nuevamente los ríos Pastaza y Chambo.
1999	En agosto se registran varios eventos volcano-tectónicos y los primeros valores altos de SO ₂ . Se observa una fumarola semipermanente de más de 100m de altura. En septiembre se declara alerta amarilla a las poblaciones cercanas y en octubre se tienen las primeras emisiones de ceniza, pasando a alerta naranja. En noviembre empieza la actividad explosiva del volcán manteniéndose en niveles altos hasta enero del 2020. A partir de febrero empieza a disminuir sobre todo drásticamente a partir del mes de septiembre.

Elaborado por: Llumigusin y Pallango

Fuente: (Almeida & Ramón, 1991; J.-L. le Pennec et al., 2005)

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. CONSISTENCIA DEL SUELO

La consistencia del suelo es una propiedad mecánica basada en la resistencia a la deformación o resistencia a la ruptura cuando se aplica una fuerza sobre él, considerando la estabilidad estructural que posee y su contenido de humedad (Porta et al., 2003).

2.1.1. CLASIFICACIÓN

Existen distintos criterios para evaluar la consistencia de un suelo, Das (2013) en su libro “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica”, presenta una clasificación de la consistencia del suelo en función de su resistencia a la compresión simple. Ver Tabla 3.

Tabla 3

Relación general de consistencia y esfuerzo de compresión simple de los suelos

Consistencia	q_u (kN/m ²)
Muy blanda	0–25
Blanda	25–50
Media	50–100
Firme	100–200
Muy firme	200–400
Dura	>400

Fuente: (Das, 2013)

Para el presente estudio, se utilizará suelo con resistencia a compresión simple menor a 80 kN/m², por lo cual se lo considerará como suelo blando.

2.1.2. SUELOS BLANDOS

En este tipo de suelo, la resistencia a la compresión simple es variable y dependiente de su estructuración, la cual disminuye con el incremento de su contenido de humedad y aumenta en presencia de silicatos o carbonatos naturales, cambiando la condición del suelo de “granulado” a “cementado” (Francisca, 2010).

Los suelos de consistencia blanda, geológicamente jóvenes y normalmente consolidados se encuentran en todo el mundo a lo largo de zonas costeras y en los alrededores de lagos y ríos. También es frecuente encontrarlo en depósitos postglaciares junto con capas de limo y arena, donde la arcilla lacustre puede aún poseer un exceso de presión de poros inicial, la cual contribuye a la inestabilidad de la capa de suelo. Estas capas se pueden extender una profundidad de más de 30 m (Berhane, 2006).

2.2. CENIZA VOLCÁNICA

La ceniza volcánica o puzolanas naturales son materiales piroclásticos encontrados en numerosas regiones del mundo, con pasado o presente volcánico (Lemougna et al., 2018). La formación de ceniza se produce por la mezcla de los fragmentos de roca sólida y magma, al ser expulsados a través del cráter durante una erupción explosiva (Sánchez et al., 2018).

Pese a su potencial para varias aplicaciones dentro del área de la ingeniería debido a su mineralogía y composición química, estos depósitos se encuentran explotados en un reducido porcentaje. La escoria y la piedra pómez son los materiales piroclásticos de mayor interés en la ingeniería, puesto que son ricos en geo-recursos de aluminosilicatos naturales como el dióxido de silicio y el óxido de aluminio (Lemougna et al., 2018).

La composición química y mineralógica de la ceniza volcánica depende del tipo de magma del cual procede. Entre los componentes predominantes en la mayoría de los depósitos estudiados entre el 2007 al 2017, se mencionan: SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , MgO , K_2O y Na_2O (Lemougna et al., 2018).

Tabla 4

Resumen porcentual de componentes mineralógicos de distintos estudios de ceniza volcánica

	(Lemouгна et al., 2014)	(Leonelli et al., 2013)	(Serra et al., 2015)	(Vu et al., 2011)	(Djon Li Ndjock et al., 2017)
SiO ₂ (%)	43 – 55	44 – 47	70.43	47.01	40 – 46
Al ₂ O ₃ (%)	15 – 16	14 – 16	15.03	19.48	12 – 16
CaO (%)	6 – 11	8 – 10	1.45	2.31	6 – 13
MgO (%)	3 – 7	3 – 7	0.64	0.35	5 – 10
Fe ₂ O ₃ (%)	8 – 14	10 – 14	3.52	1.9	12 – 13
Na ₂ O (%)	4.1 – 5.3	3 – 4	5.43	1.58	0.5 – 1.5
K ₂ O (%)	1.5 - 3	1 - 3	2.47	0.77	0 - 3

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Fuente: (Lemouгна et al., 2018)

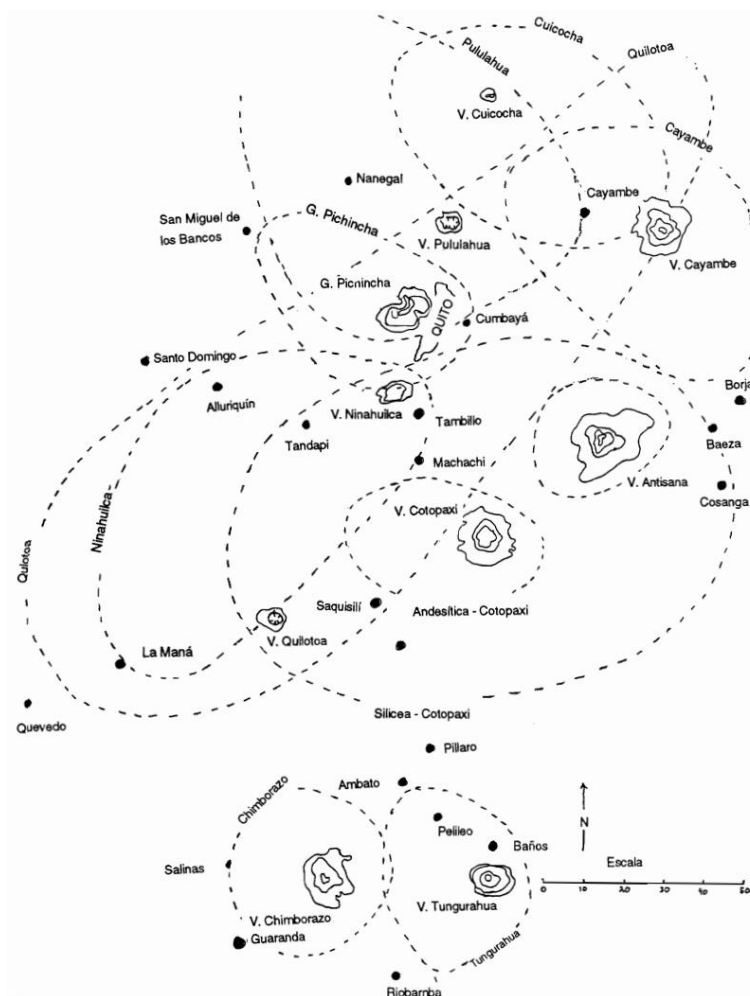


Figura 6. Distribución general de las principales cenizas volcánicas – Valle interandino – Ecuador

Fuente: (M. L. Hall & Mothes, 1994)

2.2.1. CENIZA DEL VOLCÁN TUNGURAHUA

El volcán Tungurahua ha presentado actividad de tipo estromboliana en su último período eruptivo, eyectando bloques incandescentes hasta 2 km por encima de la cumbre, los cuales descendieron por los flancos con un rodamiento de hasta 1200m bajo el nivel del cráter. También se dieron columnas eruptivas con gran cantidad de ceniza y material volcánico expulsado, produciéndose un volumen de ceniza acumulado de aproximadamente 3 000 000 m³ (Bustillos et al., 2014).



Figura 7. Actividad tipo fuente de lava, proyección de bloques incandescentes con alcance de 2 km de altura SNC

Elaborado por: J. Bustillos – IG
Fuente: (Bustillos et al., 2014)



Figura 8. Isópacas de ceniza acumulada. Distribución de los depósitos de ceniza en dos ejes; NO y O-SO producto del régimen local de los vientos.

Fuente: (Bustillos et al., 2014)

2.2.1.1. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

De acuerdo con Acuña (2017) la ceniza del volcán Tungurahua está compuesta por los minerales detallados en la Tabla 5.

Tabla 5.

Mineralogía de la ceniza volcánica del volcán Tungurahua

Mineral		%
SiO ₂	Óxido de silicio	56.2 – 58.4
Al ₂ O ₃	Óxido de aluminio	16.1 – 17
CaO	Óxido de calcio	6.6 – 6.8
MgO	Óxido de magnesio	4.1 – 4.8
Fe ₂ O ₃	Óxido de hierro (III)	7.1 – 7.4
Na ₂ O	Óxido de sodio	3.8 – 4
K ₂ O	Óxido de potasio	1.6 – 1.7

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Fuente: (Acuña, 2017)

Los porcentajes de minerales expuestos en la tabla no han presentado cambios significativos desde el año 1999 (Licuy & Román, 2020).

2.2.2. CENIZA DEL VOLCÁN COTOPAXI

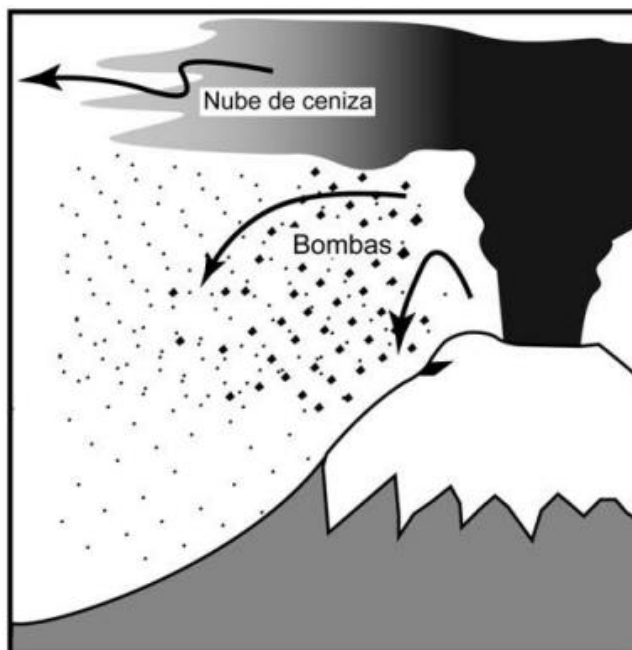


Figura 9. Esquema de una explosión volcánica con bombas volcánicas y una columna de ceniza saliendo del cráter del Cotopaxi

Fuente: (Samaniego et al., 2003)

Una de las características más importantes durante las erupciones históricas que ha presentado el volcán Cotopaxi, es la expulsión de material piroclástico, el cual, a su vez se asocia con la caída de ceniza (ver Figura 9). En las erupciones andesíticas se ha presentado emisión de ceniza volcánica en sectores ubicados al SO y NO del volcán, acumulando aproximadamente 30 cm de altura en zonas habitadas; por otro lado, en erupciones riolíticas, su alcance fue mayor, dejando depósitos de ceniza y pómez en la zona de Quito (Francou et al., 2005).

De acuerdo con reportes históricos, en 1877 durante la última gran erupción, se produjo la acumulación de 6 mm de espesor de ceniza en la ciudad de Quito, siendo ésta el doble a lo generado en el período eruptivo de 1998 - 1999 que presentó el volcán Guagua Pichincha. También se menciona que en la erupción de 1768 se produjo caída de ceniza en zonas de Pasto, ciudad límite entre Colombia y Ecuador, evidenciando la extensión que puede abarcar estos episodios volcánicos (Samaniego et al., 2003).

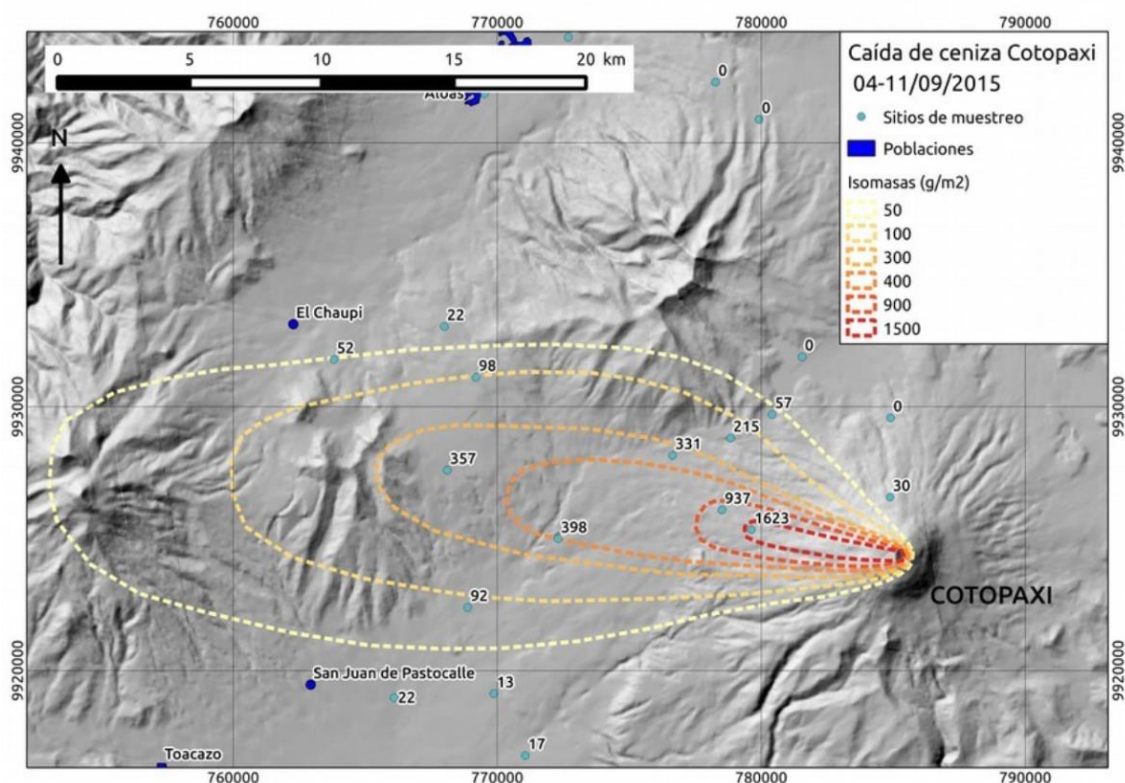


Figura 10. Mapa preliminar del depósito de caída de ceniza asociado a la actividad eruptiva del volcán Cotopaxi entre el 4 y el 11 de septiembre de 2015
Fuente: (Instituto Geofísico EPN, 2015)

2.2.2.1. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

La ceniza proveniente del volcán Cotopaxi tiene la siguiente mineralogía detallada en la Tabla 6.

Tabla 6

Mineralogía de la ceniza volcánica del volcán Cotopaxi

Mineral		%
SiO ₂	Óxido de silicio	63.35
Al ₂ O ₃	Óxido de aluminio	17.36
CaO	Óxido de calcio	4.55
MgO	Óxido de magnesio	1.17
Fe ₂ O ₃	Óxido de hierro (III)	5.5
Na ₂ O	Óxido de sodio	5.29
K ₂ O	Óxido de potasio	2.10

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Fuente: (Molina, 2021)

2.2.3. CENIZA DEL VOLCÁN GUAGUA PICHINCHA

Después de un período de relativa inactividad cuya duración fue de 340 años (Robin et al., 2008), se presentó una erupción volcánica moderada, con consecuentes formaciones de coladas de lava amontonadas, las cuales al explotar formaron columnas de ceniza en dirección al oeste, oriente y noroeste del volcán; generando así depósitos de 1,5 cm de material lítico y pumítico en la capital (Instituto Geofísico - EPN, 2018). Esta actividad, siendo la última erupción registrada, tuvo lugar en octubre de 1999 con subsiguientes afectaciones hasta mayo de 2001 (Robin et al., 2008).



Figura 11. Erupción del volcán Guagua Pichincha del 7 de octubre de 1999 a las 7 am.

Fotografía: P. Zway

Fuente: (Telenchana et al., 2019)

Robin et al. (2008) detalla los depósitos de ceniza de la siguiente manera; iniciando con los correspondientes al holoceno tardío (3000 – 4000 AP) los cuales están expuestos en los valles de los Ríos Cristal y Cinto, siendo estos rocas que varían de andesitas ácidas a dacitas, cuyo porcentaje de SiO_2 está entre el 62 y 65%; continuando con el período entre 1900 – 1800 AP, a lo largo de la vía Lloa – Refugio, se encuentra una estratigrafía comprendida por los últimos eventos eruptivos del Guagua Pichincha, junto con tefra y capa de ceniza de los volcanes Pululahua y Quilotoa. Esta capa, de 20 a 30 cm de espesor, está formada por una mezcla de lapilli, pómez y ceniza gruesa; para el siguiente ciclo eruptivo (1100 – 1000 AP) se encuentran depósitos de capas gruesas de ceniza, lapilli y pómez, con un espesor de 15 cm en la zonas de La Victoria, Nono y Mindo, y un espesor de 30 cm en las flancos superiores del volcán; finalmente, el ciclo eruptivo entre 300 – 400 AP evidencia depósitos de flujos piroclásticos dentro de los valles occidentales y a varios cientos de kilómetros del volcán. Esta capa, de 10 a 20 cm de espesor, está compuesta de piedra pómez y ceniza. De acuerdo con M. L. Hall & Mothes (1994), el alcance de este último ciclo en la provincia de Pichincha se lo puede observar por sus depósitos localizados: al Este (hasta Cumbayá), al Sur (en el Atacazo y Chillogallo) y al Oeste (hasta Mindo).

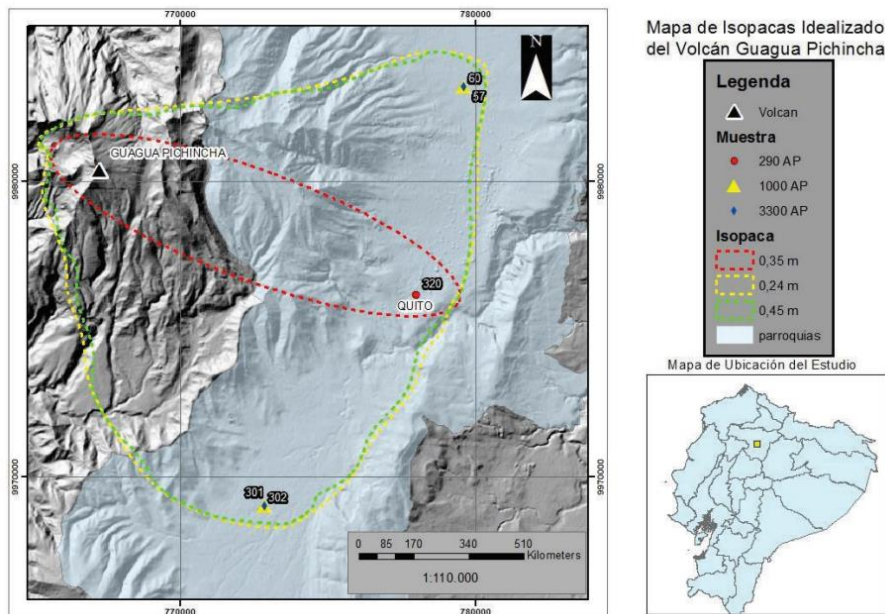


Figura 12. Mapa de isópacas proveniente de las erupciones del volcán Guagua Pichincha.
Fuente: (Vallejo, 2019)

2.2.3.1. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

La ceniza proveniente del volcán Guagua Pichincha tiene la siguiente mineralogía detallada en la Tabla 7.

Tabla 7

Mineralogía de la ceniza volcánica del volcán Guagua Pichincha

Mineral		%
SiO ₂	Óxido de silicio	63.76
Al ₂ O ₃	Óxido de aluminio	18.92
CaO	Óxido de calcio	5.04
MgO	Óxido de magnesio	1.71
Fe ₂ O ₃	Óxido de hierro (III)	3.28
Na ₂ O	Óxido de sodio	4.37
K ₂ O	Óxido de potasio	2.14

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Fuente: (Molina, 2021)

2.3. ACTIVADORES PUZOLÁNICOS

El uso de puzolanas en el ámbito constructivo se ha visto en aumento en los últimos años, debido a sus grandes ventajas como su menor costo y mayor

durabilidad. Por otro lado, sus desventajas más relevantes son el requerimiento de un mayor tiempo de fraguado y el lento desarrollo hasta alcanzar su resistencia final. Con el objetivo de superar estos inconvenientes se han estudiado métodos que mejoren o activen la reactividad puzolánica (Abdullah et al., 2012).

La teoría y principios de la activación puzolánica se conoce desde la década 1940, donde diferentes técnicas han sido estudiadas para asemejar el comportamiento mecánico de la puzolana con la pasta de cemento y concreto (Abdullah et al., 2012). De acuerdo con Shi (2001) estos métodos se pueden dividir en tres grupos: método térmico, método mecánico y método químico.

MÉTODO TÉRMICO

Este método se refiere al proceso relacionado al tratamiento con calor, y puede ser subclasificado en la calcinación de puzolanas y la elevación de temperatura de curado en pastas con contenido de puzolanas (Shi, 2001).

La calcinación se da mayormente en minerales de arcillas, donde se cambia su estructura cristalina en amorfa y a su vez, puede aumentar significativamente su reactividad puzolánica. Los efectos que tenga este proceso sobre el material dependen de: su mineralogía, la estructura de los cristales, la tensión de los enlaces, velocidad de calentamiento y las impurezas presentes (Shi, 2001).

El aumento de la temperatura en el curado es útil en los procesos donde las energías de activación de reacción sean altas, tal como sucede en la reacción entre la cal y la puzolana natural. Varios estudios han confirmado que la resistencia de las pastas puzolánicas, bajo diferentes temperaturas de curado, aumenta a medida que aumenta el contenido de puzolana. Por ejemplo, en el caso de las pastas cal-puzolana, cuando fue curada al ambiente dió una resistencia de 0.8 MPa, pero cuando fue curada a 52°C durante 7 días, su resistencia alcanzó los 6 MPa (Shi, 2001).

MÉTODO MECÁNICO

Este método se basa en la trituration del material dándose cambios estructurales y morfológicos (Ilić et al., 2016), de manera que se pueda incrementar el área de

superficie específica del material y el número de imperfecciones (centros activos) que existen en los bordes, esquinas y lugares donde las distancias interatómicas sean anormales, haciendo más reactiva a la puzolana (Shi, 2001).

MÉTODO QUÍMICO

En los años recientes, el uso del método químico para la activación ha recibido una considerable atención. Una de las maneras en las que se puede elevar la reactividad en una puzolana, particularmente en sus primeras etapas, es a partir del tratamiento con un ácido, donde el grado de activación dependerá de la concentración que tenga el ácido a usarse. Este tratamiento aumenta la reactividad puzolánica debido a la formación de gel de sílice reactivo, siendo efectivo en materiales con bajo contenido de calcio, pues en caso contrario, el Ca se disuelve y la reactividad se ve reducida (Shi, 2001).

La activación alcalina se encuentra dentro de este método químico, donde se transforma la red de estructuras vítreas en un compuesto muy compacto y bien cementado. Esta adición de productos químicos rompe los enlaces Si-O y Al-O en la estructura vítrea, acelerando la velocidad de disolución de los iones de silicio y aluminio en la fase líquida. Entre los activadores alcalinos comúnmente usados, se encuentran las soluciones de hidróxido de calcio (Ca(OH)_2), hidróxido de sodio (NaOH) e hidróxido de potasio (KOH) (Abdullah et al., 2012).

2.3.1. CAL

La cal es considerada uno de los primeros conglomerantes que el hombre usó, pues se tiene evidencia de su empleo en depósitos de más de 10 000 años de antigüedad. Su desarrollo ha pasado desde un sistema artesanal, hasta un sistema industrial automatizado, siendo hasta el siglo XX el aglutinante más usado en el área de la construcción (Herrero, 2005).

Es un material resultante de la descomposición de rocas calizas debido a la aplicación de calor; está conformada por óxido de calcio en su mayoría, junto con otros componentes (Perez et al., 2019). En la Tabla 8 se encuentra la clasificación por su composición química.

Tabla 8*Clasificación de la cal de acuerdo con su composición química*

Cal viva	Este tipo de cal es generada a partir de la calcinación de la roca caliza, con óxido de calcio (CaO) como mayor constituyente, capaz de reaccionar con el agua, produciendo su apagado o hidratación.
Cal apagada	Es un polvo seco que se obtiene a partir de la cal viva en reacción con el agua, provocando su hidratación y satisfaciendo su afinidad química. Está compuesta principalmente por hidróxido de calcio (Ca(OH) ₂) y puede encontrarse también mezclado con óxido de magnesio (MgO) e hidróxido de magnesio (Mg(OH) ₂).
Cal hidráulica hidratada	Es un producto cementante seco, hidratado, el cual es el resultado de calcinar, a una temperatura cercana al punto de fusión incipiente, calizas con contenido de sílice (SiO ₂) y alúmina (Al ₂ O ₃); de esta manera se obtiene un producto con óxido de calcio (CaO) para su hidratación, y simultáneamente silicatos de calcio (CaSiO ₃) sin hidratar. Este polvo seco presenta propiedades hidráulicas con posibilidad de fraguar y endurecer, incluso en presencia de agua.
Cal hidratada, al alto calcio	Esta cal es obtenida por la calcinación de calizas con una adición menor al 5% de carbonato de magnesio (MgCO ₃).
Cal dolomítica	Es producto de la calcinación de calizas con un contenido entre 35% - 46% de carbonato de magnesio (MgCO ₃).

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Fuente: (Perez et al., 2019)

2.3.2. CEMENTO

Los cementos hidráulicos son materiales artificiales finamente molidos, de naturaleza inorgánica y mineral, los cuales, al ser mezclados con agua, forman pastas moldeables que fraguan y endurecen debido a reacciones de hidrólisis e hidratación de sus constituyentes (Sanjuán Barbudo & Chinchón Yepes, 2004). Se los puede clasificar según el fraguado: fraguado rápido (cementos romanos) y fraguado lento; por su composición química: cementos naturales, portland, escorias, puzolánicos, sulfatados, aluminosos, entre otros; y según sus aplicaciones: alta resistencia inicial, resistente a sulfatos y bajo calor de hidratación (Valdivieso, 2012).

2.3.2.1. PRINCIPALES COMPONENTES

Los principales componentes del cemento hidráulico son: silicato tricálcico (C3S), el cual determina la mayoría de las propiedades del cemento, su endurecimiento es rápido y tiene un alcance alto de la resistencia cuando está molido finamente y mezclado con agua; silicato dicálcico (C2S), se forma a temperaturas menores a 1000°C en mezclas de arcillas crudas; aluminato tricálcico (C3A), cuya reacción con el agua es sumamente rápida y mejora la resistencia inicial del cemento; y aluminoferrito tetracálcico (C4AF), contiene la mayor parte del hierro y del aluminio (Sanjuán Barbudo & Chinchón Yepes, 2004).

2.3.2.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO

Los componentes químicos principales del cemento pueden variar entre ciertos límites; en la Tabla 9 se resumen dichos porcentajes y los requisitos establecidos por la NTE INEN 152 para cemento tipo I y IA.

Tabla 9

Resumen porcentual de la composición química aproximada de los cementos y los requisitos químicos según la NTE INEN 152

Parámetro	Rango aproximado (%) (Sanjuán Barbudo & Chinchón Yepes, 2004)	Límite Especificado (%) (NTE INEN 152)
Residuo insoluble	0,1 - 1,4	0,75 máximo
Óxido de calcio (CaO)	58,2 - 65,6	No aplicable
Sílice (SiO ₂)	19,8 - 26,45	No aplicable
Alúmina (Al ₂ O ₃)	4,1 - 9,5	6,0 máximo
Óxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	2,1 - 4,5	6,0 máximo
Magnesia (MgO)	trazas - 2,9	6,0 máximo
Álcalis (K ₂ O, NaO)	0,1 - 2,8	No aplicable
Sulfatos (SO ₃)	0,1 - 2,2	3,0 máximo
Perdida por calcinación	0,1 - 2,8	3,0 máximo

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Fuente: (NTE INEN 152, 2010; Sanjuán Barbudo & Chinchón Yepes, 2004)

Al comparar los datos obtenidos por (Sanjuán Barbudo & Chinchón Yepes, 2004) con los requisitos químicos establecidos en la NTE INEN 152, se puede verificar que cumplen con la normativa ecuatoriana.

2.3.3. HIDRÓXIDO DE SODIO

De acuerdo con la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSRD, 2002) el hidróxido de sodio, también conocido como “soda cáustica” o “sosa cáustica”, es una sustancia química manufacturada, la cual cuando se encuentra en su estado puro, es un sólido de color blanco cristalino, inoloro con gran absorción de humedad del aire. Al ser disuelta en agua, o neutralizada con un ácido, libera una gran cantidad de energía en forma calórica, dando como resultado una solución transparente similar al agua. Es corrosivo, por lo cual puede causar irritación o hinchazón de las vías respiratorias en caso de inhalación y, en caso de contacto es posible presentar quemaduras graves en el tejido.

2.3.3.1. PROPIEDADES FÍSICAS

Las propiedades físicas que presenta el hidróxido de sodio (NaOH) se encuentran resumidas en la Tabla 10.

Tabla 10

Propiedades físicas para el Hidróxido de sodio

PROPIEDAD	VALOR
Peso Molecular (g/mol)	40.0
Estado físico	Sólido; puro
Punto de Ebullición (°C) (760 mmHg)	1 390; puro 105; solución acuosa 6% peso 120; solución acuosa 34% peso 150; solución acuosa 55% peso
Punto de Fusión (°C)	318; puro
Presión de vapor (mmHg)	0; puro
Gravedad Específica (g/cm ³)	2.13; puro 1 219; 20% solución acuosa 1 430; 40% solución acuosa 1 525; 50% solución acuosa
PH	14; solución 5%
Solubilidad en Agua (g/ml)	1.11

Fuente: (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2003)

2.4. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

2.4.1. GENERALIDADES

La estabilización de suelos consiste en la modificación de sus propiedades mecánicas con el fin de generar un mejoramiento en el material (Das, 2013), de manera que pueda ser idóneo para el emplazamiento de estructuras civiles (edificios, puentes, carreteras, etc.). La aplicación de estas técnicas va encaminada a la reducción de asentamiento de las estructuras, mejoramiento de la capacidad de carga y su resistencia al esfuerzo cortante, aumento del factor de seguridad contra posibles fallas (taludes y presas de tierra), y la reducción de la expansión/contracción de los suelos (Das, 2011).

2.4.2. ESTABILIZACIÓN QUÍMICA

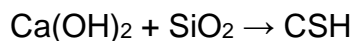
Este tipo de estabilización consiste en el uso de aditivos, los cuales, a través de una reacción química o electroquímica, causan una reorganización en la estructura interna del suelo (Florez et al., 2008), mejorando su manejabilidad como material de construcción y reduciendo su plasticidad (Das, 2013).

Se puede estabilizar químicamente al suelo con el uso de los agentes que se detallan a continuación.

2.4.2.1. ESTABILIZACIÓN CON CAL

En la mayoría de los suelos, el porcentaje de cal usada para la estabilización varía entre 5% al 10% en peso, ocurriendo dos reacciones químicas de importancia: el intercambio catiónico, donde los cationes monovalentes de las arcillas se ven reemplazados por iones de calcio divalentes; y la floculación-aglomeración, la cual cambia la textura del suelo, agrupándolas de manera que se unan y formen partículas más grandes. Este proceso genera la disminución de límite líquido e índice de plasticidad, el aumento del límite plástico, de contracción y manejabilidad, y mejora las propiedades de resistencia y deformación del suelo (Das, 2013).

Dentro de las reacciones puzolánicas que se puede producir con la incorporación de cal en el suelo, es la formación de material de cementación cuando hay la existencia de sílice y alúmina.



Donde:

C = CaO (óxido de calcio)

S = SiO₂ (Sílice)

H = H₂O

La resistencia a la compresión es una de las propiedades mecánicas que se ven mejoradas al momento de estabilizar; de acuerdo con Das (2013), el tiempo de curado juega un papel importante, llegando a darse un aumento de 700 kN/m² o más, luego de los 28 días y con un porcentaje de adición entre 3-5% de cal.

2.4.2.2. ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO

Uno de los métodos más comunes para la estabilización química es la mezcla de suelo con cemento hidráulico, de esta forma se obtiene una nueva pasta que puede ser compactada a la densidad deseada. Existen cuatro propiedades principales del suelo que se pueden mejorar con esta mezcla: la resistencia, permeabilidad, estabilidad de volumen y durabilidad (Firoozi et al., 2017).

El cemento hidráulico puede ser usado para estabilizar cualquier tipo de suelo, exceptuando aquellos que tengan un contenido orgánico mayor al 2% o un PH menor a 5.3 (Firoozi et al., 2017); y tiene mayor eficacia en suelos arcillosos, con límite líquido menor a 45 e índice de plasticidad menor a 25, y suelos granulares (Das, 2013).

Los resultados entre las estabilizaciones con cemento y cal son similares, puesto que ambas aumentan la resistencia del suelo en forma directamente proporcional a su tiempo de curado. Por esta razón, al momento de estabilizar arcillas es importante seleccionar adecuadamente el material (Das, 2013), ya que ésta puede ser estabilizada de acuerdo a su ión intercambiable (sodio o calcio), cambiando su comportamiento al sustituir tales cationes por otro de mayor valencia (Guzmán, 2009); siendo las arcillas de calcio más susceptibles a la estabilización con cemento, y las arcillas de sodio (naturaleza expansiva) teniendo un mejor comportamiento con la adición de cal (Das, 2013).

Los porcentajes óptimos de cemento a usarse según el tipo de suelo se detallan en la Tabla 11.

Tabla 11

Cemento requerido en volumen para la estabilización efectiva de varios suelos

Tipo de suelo		Porcentaje de cemento en volumen
Clasificación AASHTO	Clasificación Unificada	
A-2 Y A-3	GP, SP Y SW	6-10
A-4 Y A-5	CL, ML Y MH	8-12
A-6 Y A-7	CL, CH	10-14

Fuente: (Das, 2011)

2.4.2.3. ESTABILIZACIÓN CON CENIZA VOLANTE

La ceniza volante es uno de los cuatro productos de la combustión del carbón, considerada un polvo fino formado por granos, que se encuentran entre 0.5 – 300 µm. Está compuesta principalmente por silicatos, óxido de aluminio, óxidos varios y cal libre; siendo este último el material que le proporciona propiedades puzolánicas, las cuales reducen el índice de expansión del suelo (Florez et al., 2008).

Se ha realizado varios estudios respecto a su uso en forma cruda y en conjunto con activadores, encontrándose que éstos, por si solos, no pueden alcanzar la estabilización deseada, ya que pertenecen a los aglutinantes secundarios. Sin embargo, en presencia de una cantidad mínima de activador (cal), la fracción menor a 40 µm reacciona químicamente, formando compuestos cementicios los cuales ayudan a que la resistencia mecánica del suelo mejore (Afrin, 2017; Florez et al., 2008).

Según Afrin (2017), para la estabilización con este tipo de ceniza, se debe tener en cuenta las siguientes limitaciones:

- El contenido de humedad del suelo debe ser bajo, por lo que en ocasiones se requiere de una deshidratación.
- En caso de presencia de azufre en el suelo estabilizado, puede darse la formación de minerales expansivos, disminuyendo a largo plazo su durabilidad y resistencia.

2.4.3. ESTABILIZACIÓN MECÁNICA

Es el proceso por el cual se mejoran las propiedades del suelo cambiando su granulometría; se logra mediante la mezcla de dos o más tipos de suelos en conjunto con los procesos mecánicos, tales como la compactación o densificación, de manera que se obtenga un material compuesto que cumpla con las especificaciones técnicas (Afrin, 2017).

2.4.3.1. VIBROFLOTACIÓN

Esta técnica se usa para la densificación de suelos granulares sueltos cuando se encuentran en capas gruesas. El dispositivo necesario para este proceso es conocido como unidad vibratoria, el cual mide aproximadamente 2.1 m de largo, generando una vibración horizontal debido a la fuerza centrífuga desarrollada por un peso excéntrico internamente colocado. Esta máquina se encuentra conectada a una tubería de seguimiento, de manera que a su vez pueda agregar agua al suelo, en forma de chorros, para que éste transporte el material granular y lo reacomode (Das, 2013).

2.4.3.2. COMPACTACIÓN

En este proceso se aplica una energía mecánica a partir de un peso, ya sea con un martillo en caída libre en intervalos regulares, o mediante maquinaria (rodillos o apisonadoras). El objetivo es disminuir los espacios vacíos del suelo, obteniendo su densidad seca máxima junto con la humedad óptima, y por ende mejorando su estabilidad y capacidad de soporte (Das, 2013).

CAPÍTULO 3

MUESTREO Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS Y ENSAYOS

3.1. MUESTREO DEL SUELO

Como fue mencionado anteriormente, el suelo fue extraído de un talud en la vía Panamericana Norte, entre Quito y Guayllabamba, con el cual se realizará el presente estudio. Su ubicación se presenta en la Figura 13 y 14.

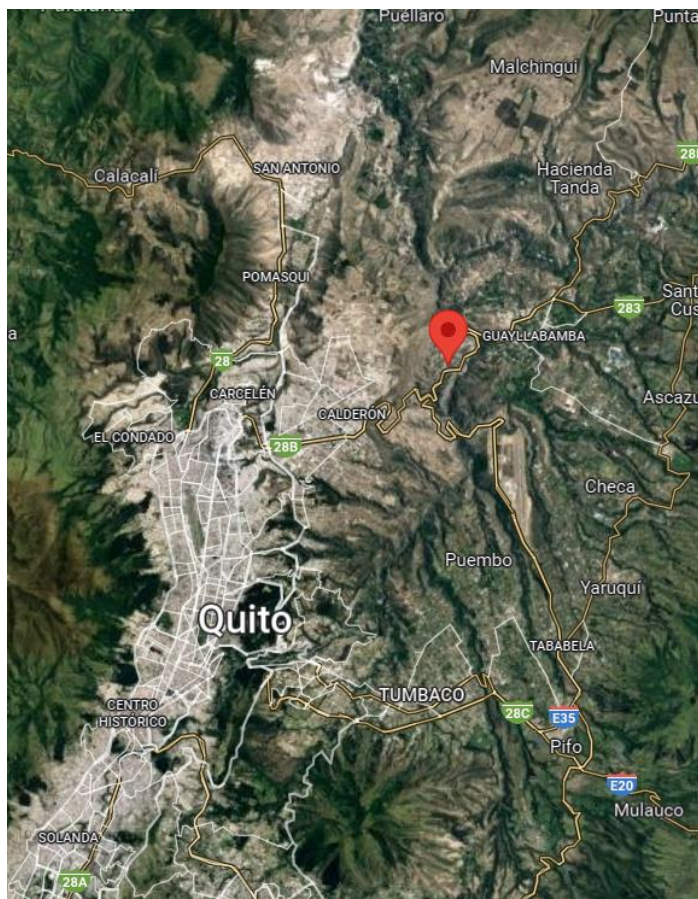


Figura 13. Ubicación de la muestra a estabilizar
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)



Figura 14. Lugar de extracción del suelo (vía Panamericana Norte)
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

La toma de la muestra fue realizada con la ayuda de personal del Laboratorio de Ensayos de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas (LEMSUR), considerando lo especificado en la norma NTE INEN 686 MECÁNICA DE SUELOS. TOMA DE MUESTRAS ALTERADAS. Las mismas que fueron transportadas en sacos de polietileno hacia el laboratorio, debidamente identificadas.

3.2. MUESTREO DE LAS CENIZAS VOLCÁNICAS

Para este estudio, fueron consideradas las cenizas de tres volcanes del Ecuador: Tungurahua, Cotopaxi y Guagua Pichincha; en la Tabla 12 se detalla las coordenadas geográficas de cada sitio de muestreo de dichas cenizas.

Tabla 12

Coordenadas geográficas de las muestras de ceniza de cada volcán.

MUESTRA	LATITUD	LONGITUD
Tungurahua	1°21'27.22"S	78°29'45.37"O
Cotopaxi	0°55'36.7"S	78°38'52.01"O
Guagua Pichincha	0°11'46.66"S	78°35'20.48"O

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

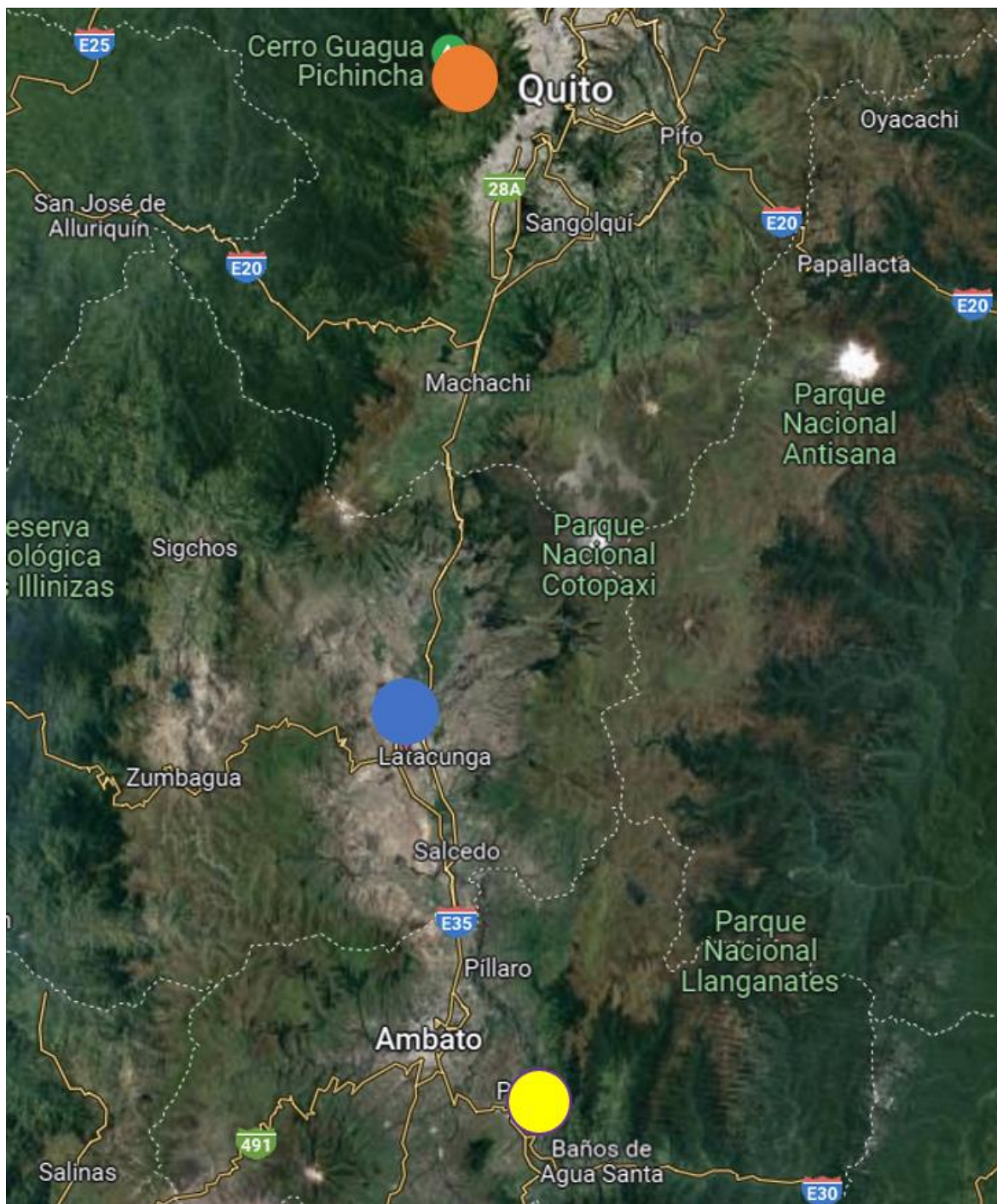


Figura 15. Vista en Google Maps de los lugares de extracción de la ceniza volcánica (Naranja: Volcán Guagua Pichincha; Azul: Volcán Cotopaxi; Amarillo: Volcán Tungurahua)

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

3.2.1. CENIZA DEL VOLCÁN TUNGURAHUA

La ceniza del volcán Tungurahua, fue obtenida por el personal del Instituto Geofísico (IG-EPN) y del LEMSUR en el depósito lahárico de la quebrada

Achupashal, situada cerca del Observatorio Vulcanológico del Tungurahua. En la Figura 16 se encuentra el sector del muestreo.



Figura 16. Lugar de extracción de la ceniza del volcán Tungurahua, depósito lahárico por la quebrada Achupashal.

Fuente: (Manosalvas, 2014a)

Estas muestras fueron extraídas en estado consolidado y transportadas al laboratorio del LEMSUR, para sus respectivos tratamientos y estudios.

3.2.2. CENIZA DEL VOLCÁN COTOPAXI

La muestra de ceniza del volcán Cotopaxi fue recogida en un depósito ubicado en el sector de San Felipe – Latacunga, a una altura de 2852 msnm. Este depósito se lo puede identificar debido a su color gris. En la Figura 17 se aprecia el talud de muestreo.



Figura 17. Lugar de extracción de la ceniza del volcán Cotopaxi. Depósito en el sector de San Felipe – Latacunga
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

3.2.3. CENIZA DEL VOLCÁN GUAGUA PICHINCHA

La ceniza del volcán Guagua Pichincha fue obtenida de una zona de ascenso hacia el páramo del volcán, cercana a la parroquia de Lloa, perteneciente al Distrito Metropolitano de Quito (DMQ). La muestra se encuentra en un estrato cuyo espesor es de aproximadamente 2.0 m y se la reconoce por su coloración blanca. En la Figura 18 se presenta el estrato del cual fue obtenida la muestra.



Figura 18. Lugar de extracción de la ceniza del volcán Guagua Pichincha. Depósito en zona de ascenso al páramo del volcán.
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

3.3. PREPARACIÓN DE LA PUZOLANA

Las cenizas pertenecientes a los tres volcanes tuvieron un proceso de preparación similar.

Se realizó un primer proceso de secado, en el que se introdujo las muestras en un horno de ventilación, a una temperatura de $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, durante 24 horas.



Figura 19. Muestra seca de ceniza del volcán Cotopaxi.
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)



Figura 20. Muestra seca de ceniza del volcán Guagua Pichincha
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)



Figura 21. Muestra seca de ceniza del volcán Tungurahua
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Fue necesario realizar una molienda en la Máquina de Los Ángeles, de manera que se pudo pulverizar la mayor cantidad de ceniza posible, aplicando 800 revoluciones con 12 esferas de abrasión para cada ceniza volcánica.

Cabe mencionar que para la ceniza del volcán Tungurahua, fue requerido el uso de rotomartillo para una disgregación primaria debido al tamaño de cada piedra, ver Figura 22.



Figura 22. Proceso de molienda para las cenizas (volcán Tungurahua)
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

A partir de un procedimiento de cribado, se separó el material volcánico fino que pasa el tamiz #200.



Figura 23. Proceso de tamizado para las cenizas (volcán Tungurahua)
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Como resultado de este proceso se obtuvo el material fino de cada fuente volcánica que fue usado en el resto de la investigación y denominada puzolana de alto contenido de sílice.



Figura 24. Material fino (ceniza) obtenido de la muestra del volcán Guagua Pichincha
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)



Figura 25. Material fino (ceniza) obtenido de la muestra del volcán Cotopaxi
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)



Figura 26. Material fino (ceniza) obtenido de la muestra del volcán Tungurahua
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

3.4. PREPARACIÓN DE HIDRÓXIDO DE SODIO

La concentración molar para la activación puzolánica con hidróxido de sodio fue de 10 M, la cual se detalla más adelante; ésta fue seleccionada a partir de diversos estudios, tal como el de Puertas et al. (2000), donde se establece un rango de concentración molar entre 2 – 10 para la activación de pastas con cenizas volantes, dando un incremento de aproximadamente 50 MPa en las muestras luego de 28 días de curado a temperatura ambiente (25°C).

Para la preparación del reactivo se usó como diluyente 5 litros de agua destilada, para una solución de 10 M, considerando una cantidad de 2000 g de hidróxido de sodio sólido, ver Figura 27.

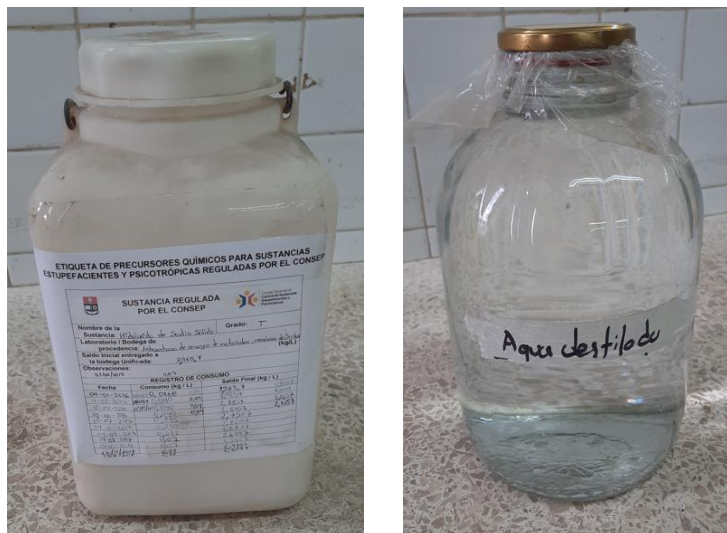


Figura 27. a) Hidróxido de sodio sólido b) Agua destilada
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

A continuación, se presenta los cálculos realizados para dichos valores.

Ecuación 1. Ecuación para el cálculo de número de moles

$$M = \frac{n}{V}$$

Donde:

M = Número de moles (mol/lit)

n = Moles de soluto (mol)

V = Volumen de disolución (lit)

Para la masa molar del hidróxido de sodio (NaOH) se consideró de la siguiente manera:

Na = 23 g/mol

O = 16 g/mol

H = 1 g/mol

Por lo tanto, se tiene una masa molar de 40 g/mol del soluto. Considerando una cantidad de 2000 g de NaOH, se debe transformar a moles:

$$\text{mol de NaOH} = \frac{2000 \text{ g}}{40 \text{ g/mol}} = 50 \text{ mol de NaOH}$$

Reemplazando en la Ecuación 1

Ecuación 2. Reemplazo de variables

$$10 \text{ mol/lt} = \frac{50 \text{ mol de NaOH}}{V}$$

Al despejar la variable y resolver la Ecuación 2, se obtiene:

$$V = 5 \text{ lt}$$

El proceso de disolución de NaOH se lo realizó con los debidos cuidados dado al desprendimiento de energía calórica generada por la reacción.



Figura 28. Preparación de solución de Hidróxido de Sodio con concentración de 10 M

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

3.5. DOSIFICACIONES DE LAS MEZCLAS

Como punto de partida, se realizó la estabilización del suelo con los activadores puzolánicos, sin el uso de cenizas volcánicas, en dosificaciones del 2% y 3% de cemento y de cal. No se consideró la estabilización de suelo con hidróxido de sodio, puesto que, es un activador químico que requiere de una puzolana para su

reacción, y al no estar presente la ceniza volcánica, el suelo en su estado natural se considera de baja reactividad puzolánica.

La estabilización del suelo se realizó a partir del reemplazo, respecto al peso del suelo en condiciones de humedad óptima, del 2% y 3% de los activadores puzolánicos anteriormente descritos (cemento, cal e hidróxido de sodio) junto con 3% y 6% de cada ceniza volcánica (Tungurahua, Cotopaxi y Guagua Pichincha).

En la Tabla 13 se presenta las dosificaciones con su respectiva nomenclatura.

Tabla 13

Dosificaciones y nomenclatura de mezclas de puzolana con activadores

Activadores puzolánicos / Puzolanas Naturales	Muestra Patrón	Ceniza Volcán Cotopaxi		Ceniza Volcán Tungurahua		Ceniza Volcán Guagua Pichincha		
		0%	3%	6%	3%	6%	3%	6%
Cemento	2%	SN-Ce2	VC3-Ce2	VC6-Ce2	VT3-Ce2	VT6-Ce2	VP3-Ce2	VP6-Ce2
	3%	SN-Ce3	VC3-Ce3	VC6-Ce3	VT3-Ce3	VT6-Ce3	VP3-Ce3	VP6-Ce3
Cal	2%	SN-Ca2	VC3-Ca2	VC6-Ca2	VT3-Ca2	VT6-Ca2	VP3-Ca2	VP6-Ca2
	3%	SN-Ca3	VC3-Ca3	VC6-Ca3	VT3-Ca3	VT6-Ca3	VP3-Ca3	VP6-Ca3
Hidróxido de sodio	2%	-	VC3-Hi2	VC6-Hi2	VT3-Hi2	VT6-Hi2	VP3-Hi2	VP6-Hi2
	3%	-	VC3-Hi3	VC6-Hi3	VT3-Hi3	VT6-Hi3	VP3-Hi3	VP6-Hi3

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

3.6. ENSAYOS EN MUESTRAS DE SUELO NATURAL

Los ensayos realizados para la muestra de suelo en su estado natural (sin estabilizar con ceniza y activadores puzolánicos), será descrito a continuación. Dichos ensayos son llevados a cabo, de manera que se pueda caracterizar al suelo, física y mecánicamente, y así analizar sus propiedades previas a su estabilización.

Las normas a las cuales se rigen las pruebas de laboratorio son de acuerdo con la American Society for Testing and Materials (ASTM).

3.6.1. GRANULOMETRÍA POR LAVADO

De acuerdo con la norma ASTM D6913, este método consiste en la separación de partículas con ayuda de tamices, de forma que se obtenga la cantidad de material en rangos establecidos por su tamaño. A continuación, se describe el proceso del ensayo.

Preparación de la muestra

- Debido a que el suelo presentó material de tamaño menor a 2 mm (tamiz #10) se tomó una cantidad mínima de 50 g representativa del suelo, acorde a lo requerido por la norma ASTM D6913. A su vez, se realizó la toma de dos muestras de 30 g cada una, para obtener el contenido de humedad por duplicado, las cuales fueron llevadas al horno a $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 24 horas.
- Una vez seleccionada la muestra para la granulometría, se procedió a realizar un lavado con los tamices #200 (0.075 mm) y #40 (0.425 mm), para separar la parte fina de la gruesa, lo cual se evidencia cuando el agua pasa de manera limpia por el tamiz. Lo retenido se transfiere a una cápsula para ser colocada en el horno a $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 24 horas.

Procedimiento

- Colocar los tamices en el orden de abertura. Ver Tabla 14.

Tabla 14

Tamaño de abertura de tamices en milímetros

Tamiz	Abertura (mm)
3/8 in	9.5
N° 4	4.75
N° 10	2.00
N° 20	0.850
N° 40	0.425
N° 60	0.250
N° 100	0.150
N° 140	0.106
N° 200	0.075
Bandeja	-

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)



Figura 29. Tamices para granulometría
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

- Colocar la muestra en el tamiz superior y sacudir de manera manual por aproximadamente 10 minutos.
- Pesar lo retenido en cada malla con una apreciación de 0.01g.

A partir de esta granulometría, y realizando una corrección de humedad con el peso total seco después del lavado, se generó una curva granulométrica cuyas abscisas contienen las aberturas de cada malla en mm y escala logarítmica; y las ordenadas presentan los porcentajes acumulados del material que pasa por su respectivo tamiz, en escala aritmética. Ver Figura 30.

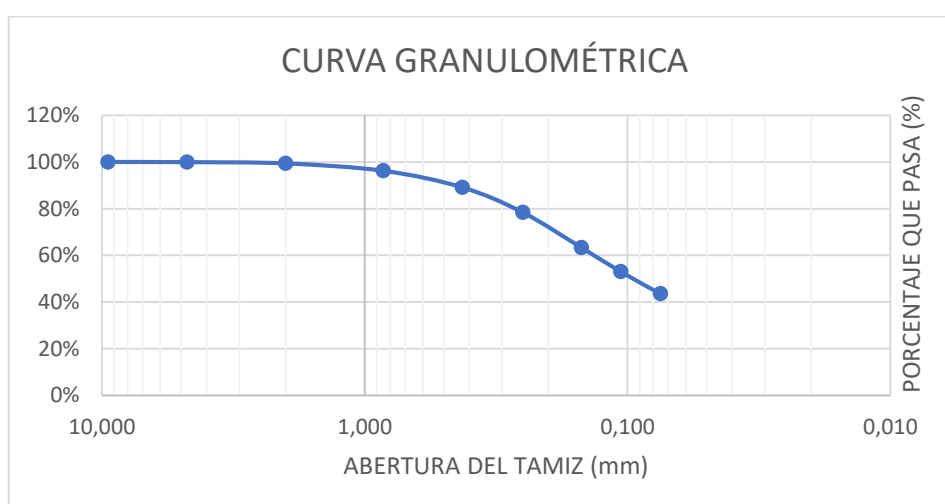


Figura 30. Curva Granulométrica
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Los resultados de la granulometría se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15

Granulometría por tamizado de la muestra de suelo natural

GRANULOMETRÍA					
ASTM D6913					
SUELO NATURAL					
PESO INICIAL (g):		120	PESO CORREGIDO (g):		117,65
TAMIZ N°	ABERTURA TAMIZ (mm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE PASANTE (%)
3/8"	9,500	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
N° 4	4,750	0,08	0,07%	0,07%	99,93%
N° 10	2,000	0,65	0,55%	0,62%	99,38%
N° 20	0,850	3,70	3,14%	3,77%	96,23%
N° 40	0,425	8,36	7,11%	10,87%	89,13%
N° 60	0,250	12,64	10,74%	21,61%	78,39%
N° 100	0,150	17,64	14,99%	36,61%	63,39%
N° 140	0,106	12,20	10,37%	46,98%	53,02%
N° 200	0,075	11,11	9,44%	56,42%	43,58%
BANDEJA	-	51,27	43,58%	100,00%	0,00%
TOTAL		117,65			

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

A partir de estos resultados, es posible calcular el coeficiente de uniformidad (C_u) y coeficiente de gradación (C_c) mediante las siguientes ecuaciones:

Ecuación 3. Coeficiente de uniformidad

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Ecuación 4. Coeficiente de gradación

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

Donde:

D_{60} : tamaño de abertura de tamiz por el cual pasa el 60% del material.

D_{30} : tamaño de abertura de tamiz por el cual pasa el 30% del material.

D_{10} : tamaño de abertura de tamiz por el cual pasa el 10% del material.

3.6.2. LÍMITES DE ATTERBERG

Este método corresponde a la determinación de la consistencia de suelos cohesivos con diferentes contenidos de humedad; pudiendo tener un comportamiento quebradizo (sólido) al presentarse baja humedad, o fluir como un líquido de ser el caso contrario (alta humedad). Bajo esta premisa, se puede identificar cuatro estados básicos del suelo: sólido, semisólido, plástico y líquido (Das, 2013). Ver Figura 31.

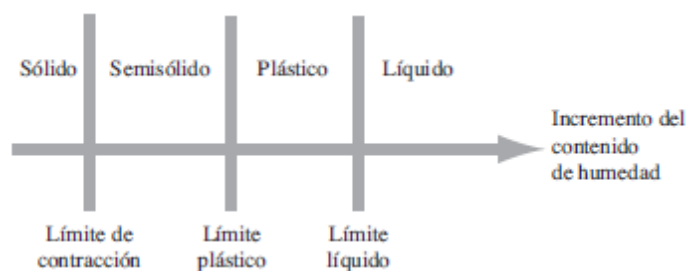


Figura 31. Estados básicos del suelo de acuerdo con el contenido de humedad
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Este ensayo se realizó de acuerdo con los parámetros especificados en la norma ASTM D4318. Se detalla el proceso de cada límite a continuación.

3.6.2.1. LÍMITE PLÁSTICO

Preparación de la muestra.

- Se selecciona un tamaño de 20 gramos o más, representativos del suelo.
- Se humedece el suelo, hasta que se tenga una consistencia en la cual sea posible su moldeo.
- Se reduce el contenido de humedad esparciéndolo o mezclándolo en la placa de vidrio con la palma de la mano, hasta llegar a una consistencia en la cual sea posible moldear el suelo sin que sea pegajoso al tacto.

Procedimiento

- De la muestra previamente descrita, se tomó una porción de 2 gramos aproximadamente.

- Se debe mover la porción en forma de rollo con la palma de la mano o los dedos sobre una superficie lisa, con suficiente presión hasta obtener un rollo de diámetro uniforme de 3.2 mm.
- Una vez llegado a este diámetro, se continúa rolando de manera que se disminuya su contenido de humedad hasta que la tira se parta en varias piezas, en este punto se considera que llego a su límite plástico.
- En caso de que no sea posible llegar a la consistencia deseada, se considera que el suelo no tiene límite plástico

El suelo de este estudio presentó una baja plasticidad, puesto que no fue posible llegar a la consistencia ideal para formar los cilindros del diámetro requerido. Ver Figura 32 y 33.



Figura 32. Esfera de suelo natural para ensayo de límite plástico
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)



Figura 33. Cilindros de suelo natural para ensayo de límite plástico
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

3.6.2.2. LÍMITE LÍQUIDO

Preparación de la muestra.

- En una cápsula se colocó una muestra de suelo seco de aproximadamente 50 gramos de peso.
- En el envase se procedió a humedecer la muestra, mezclándola bien de manera que el suelo se homogenice correctamente con el agua.

Procedimiento

- De la muestra previamente descrita, se tomó una porción con la espátula, y se colocó en la copa de Casagrande. Se enrazó el suelo, aplicando una ligera presión, de manera que se uniformizó la superficie.
- Con ayuda del borde biselado del ranurador se realizó un corte en la superficie enrazada previamente, generando una abertura longitudinal que divide al suelo por la mitad.
- Se aplicó una energía al suelo a partir de una caída con ayuda de la copa de Casagrande, a una velocidad de 1.9 a 2.1 golpes por segundo, hasta que las dos mitades del suelo se pongan en contacto en una longitud de 13 mm.
- Se anotó el número de golpes requeridos para la unión, verificando que se encuentre entre 20 – 30. En caso de no ser así, se debe modificar la humedad y empezar nuevamente.
- Se seccionó la parte de la unión para colocarla en una cápsula y obtener su contenido de humedad.

- Este proceso se repitió en las mismas condiciones, verificando que el número de golpes obtenido sea de ± 2 golpes en comparación al anterior.

Como se observa en la Figura 34 y 35, no fue posible aplicar el ensayo al suelo en estudio, puesto que no se pudo realizar la ranura requerida cuando éste se encontraba humedecido. Por lo tanto, se considera que posee un límite líquido bajo.



Figura 34. Suelo natural enraizado en copa de Casagrande
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)



Figura 35. Suelo ranurado en copa de Casagrande
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

En caso de suelos con límites de Atterberg definidos, la obtención del índice de plasticidad se debe realizar con la Ecuación 5.

Ecuación 5. Índice de plasticidad

$$IP = LL - LP$$

Donde:

LL: Límite líquido

LP: Límite plástico

3.6.3. CLASIFICACIÓN SUCS

Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), se caracteriza cualitativamente al suelo considerando su granulometría y plasticidad, dando como resultado tres categorías principales: gravas y arenas (cantidad de suelo retenido en el tamiz #200 mayor al 50%), limos y arcillas (cantidad de suelo retenido en el tamiz #200 menor o igual al 50%) y suelos altamente orgánicos (turba o lodo) (Das, 2013).

Dentro de las tres categorías mencionadas anteriormente, se obtienen 15 subclasificaciones, ver Figura 36.

Criterio para la asignación de símbolos de grupo		Símbolos de grupo
Gravas Más de 50% de fracción gruesa retenida en el tamiz núm. 4	Gravas limpias Menos de 5% finos ^a	GW GP
Suelos de grano grueso Más de 50% retenido en el tamiz núm. 200	Gravas con finos Más de 12% finos ^{a,d}	GM GC
Arenas 50% o más de la fracción gruesa pasa tamiz núm. 4	Arenas limpias Menos de 5% finos ^b Arenas con finos Más de 12% finos ^{b,d}	SW SP SM SC
Limos y arcillas Límite líquido menor que 50	Inorgánico	CL ML
Suelos de grano fino 50% o más pasa a través del tamiz núm. 200	Orgánico	OL
Limos y arcillas Límite líquido 50 o más	Inorgánico	CH MH
	Orgánico	OH
Suelos altamente orgánicos	Materia orgánica principalmente, color oscuro y orgánico	Pt

^aGravas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: GW-GM, GW-GC, GP-GM, GP-GC.

^bArenas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC.

$${}^c C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}; \quad C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

^dSi $4 \leq PI \leq 7$ y gráficos en la zona rayada en la figura 4.2, se usa doble símbolo GC-GM o SC-SM.

^eSi $4 \leq PI \leq 7$ y gráficos en la zona rayada en la figura 4.2, se usa doble símbolo CL-ML.

Figura 36. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

Fuente: (Das, 2013)

Para este procedimiento de clasificación se requiere la siguiente información:

- Porcentaje de suelo que fue retenido en el tamiz #4 (grava).
- Porcentaje de suelo retenido entre el tamiz #200 y el tamiz #4 (arena).
- Porcentaje de suelo que pasa el tamiz #200 (limo y arcilla).
- Coeficientes de uniformidad (C_u) y de gradación (C_c).
- Límite líquido e índice de plasticidad.

Junto con la Carta de Plasticidad (Figura 37) y la información descrita previamente, es posible clasificar al suelo.

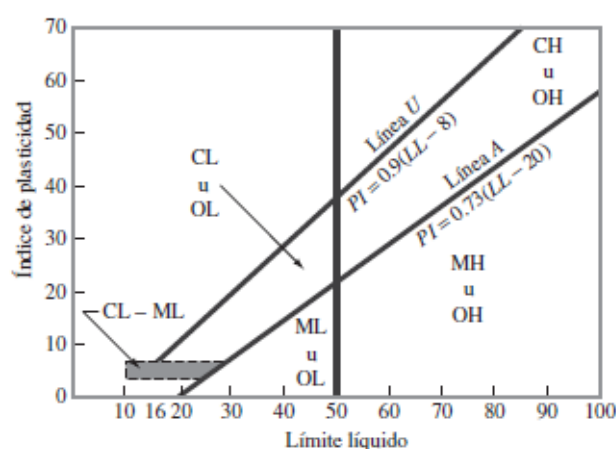


Figura 37. Carta de Plasticidad

Fuente: (Das, 2013)

El informe de laboratorio correspondiente a esta clasificación se presenta en el Anexo 1, siguiendo la norma ASTM D2847 para sus cálculos y ensayos. En la Tabla 16 se presenta el resultado para el suelo natural.

Tabla 16

Clasificación SUCS de la muestra de suelo natural

CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)			
ASTM 2487-17			
MUESTRA	LÍMITE LÍQUIDO (%)	LÍMITE PLÁSTICO (%)	SUCS
Suelo Natural	NP	NP	SM

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

3.6.4. COMPACTACIÓN PROCTOR ESTÁNDAR

La compactación en suelos es aplicada como método de mejoramiento de la resistencia y capacidad de carga. Comúnmente para este proceso se usan rodillos de ruedas lisas, rodillos compactadores de suelo, rodillos neumáticos de goma o rodillos vibratorios (Das, 2013).

De acuerdo con la ASTM D698, este ensayo se define como la determinación de la relación entre el contenido de agua de una muestra y su peso unitario seco, dando como resultado una curva de compactación, de la cual se puede obtener su pico, siendo éste su “densidad seca máxima” y el “contenido de humedad óptima”; parámetros usados al momento de compactar en campo. A continuación, se detalla el proceso del ensayo.

Preparación de la muestra.

- Colocar a secar la cantidad de 16 Kg de suelo en horno a $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 24 horas.
- Se criba la muestra con ayuda del tamiz #4, 3/8" y 3/4".
- Se pesa la cantidad retenida en cada tamiz mencionado previamente, de manera que se calcule los porcentajes de cada uno.
- Se define el método a usarse a partir de los porcentajes obtenidos (ver Tabla 17). El suelo de este estudio se encuentra dentro del método A, ya que menos del 25% de la muestra se retuvo en el tamiz #4.

Tabla 17
Resumen de método A, B y C para Proctor Estándar

MÉTODO	A	B	C
Condición	25% o menos es retenido en el tamiz #4	25% o menos es retenido en el tamiz 3/8"	30% o menos es retenido en el tamiz 3/4"
Molde	Diámetro de 4 pulg. (101,6 mm)	Diámetro de 4 pulg. (101,6 mm)	Diámetro de 6 pulg. (152,4 mm)
Material	Usar el material que pasa el tamiz #4	Usar el material que pasa el tamiz de 3/8"	Usar el material que pasa el tamiz de 3/4"
Capas	3	3	3
Golpes por capa	25	25	56

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)
Fuente: ASTM D698

- Como se observa en la Tabla 17, para la compactación Proctor Estándar de método A se debe emplear el suelo pasante del tamiz #4.



Figura 38. Suelo natural seco que pasa el tamiz #4
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Procedimiento

- Para este ensayo se requiere de un molde circular, el cual tiene dimensiones de 101.6 mm de diámetro con una altura de 116.43 mm (ver Figura 39); junto con un martillo, con el que se aplicó un peso de 24.4 N a caída libre, a una altura de 304.8 mm. Ver Figura 40.



Figura 39. Molde para Proctor Estándar (método A)
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

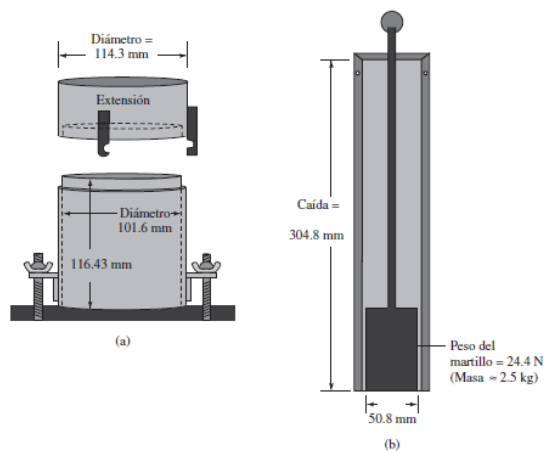


Figura 40. Equipos para ensayo de Proctor Estándar (método A)
Fuente: (Das, 2013)

- Se arma el molde, con una placa en la base inferior y un anillo de extensión superior removible.
- Se mezcla el suelo con una cantidad de agua suficiente para formar una masa húmeda uniforme.



Figura 41. Suelo natural mezclado con agua para ensayo de Proctor Estándar (método A)
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

- Con ayuda de una pala, se coloca el suelo en el molde para compactarlo con el martillo descrito con 25 golpes en distintos puntos de la superficie, de manera que se pueda repartir el peso lo más uniforme posible (Figura 42). Este proceso se repite en tres capas iguales, hasta tener una altura mayor a la del molde sin extensión.

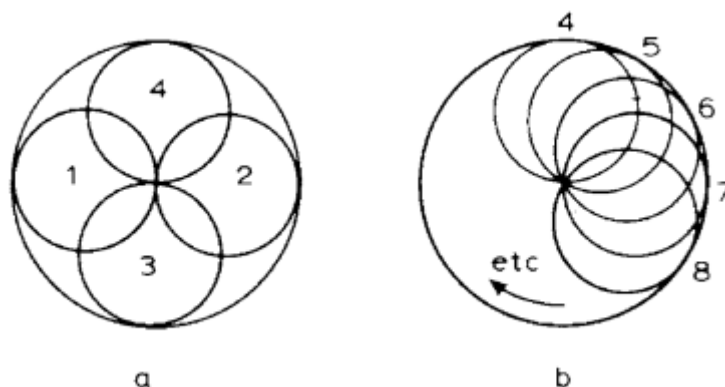


Figura 42. Patrón de golpes uniformes en superficie de cada capa para ensayo de Proctor Estándar (método A)

Fuente: ASTM D 698



Figura 43. Ensayo de compactación Proctor Estándar (método A)

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

- Se retira la extensión para proceder a enrasar la muestra compactada.



Figura 44. Enrazado de muestra natural para ensayo de Proctor Estándar (método A)

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

- Se pesa el molde con suelo húmedo compactado, y posteriormente se toman dos muestras de 50 gramos aproximadamente, en capsulas metálicas para obtener el contenido de humedad de dicho suelo.
- Se repite el proceso, incrementando el contenido de humedad del suelo a razón del 4% de agua con respecto al peso seco, hasta que el peso del molde con suelo húmedo disminuya; se debe obtener al menos 4 puntos de referencia para formar la curva de compactación (2 puntos en la rama seca y 2 puntos en la rama húmeda).

El informe de laboratorio correspondiente a este ensayo se presenta en el Anexo 2, siguiendo la norma ASTM D698 para sus cálculos y procedimiento. En la Tabla 18 se presenta el resultado para el suelo natural.

Tabla 18

Densidad seca máxima y humedad óptima de la muestra de suelo natural

COMPACTACIÓN PROCTOR ESTÁNDAR		
ASTM D698		
MUESTRA	DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm ³)	HUMEDAD ÓPTIMA (%)
Suelo Natural	1.498	14.39

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

3.6.5. COMPRESIÓN SIMPLE

Esta prueba consiste en aplicar una fuerza axial a la muestra y evaluar la deformación que se produce hasta su colapso. Se basa en la norma ASTM D2166 para realizar el ensayo, donde se especifican los requerimientos de la muestra, procedimientos y cálculos.

El principal propósito de este ensayo de compresión no confinado es la determinación, aproximada, del esfuerzo máximo a la compresión que presenta el suelo, de manera rápida y económica; y puede ser aplicado tanto para suelos remoldeados como inalterados. En la Figura 45 se presenta el equipo necesario para realizar este ensayo.



Figura 45. Equipo de prueba de Compresión no confinada (Resistencia a compresión simple)
Fuente: (Das, 2013)

En esta prueba, al aplicar únicamente una carga axial hasta llegar a la falla del espécimen, la presión de confinamiento σ_3 es 0 y el esfuerzo principal mayor total es σ_1 , como se observa en la Figura 46.

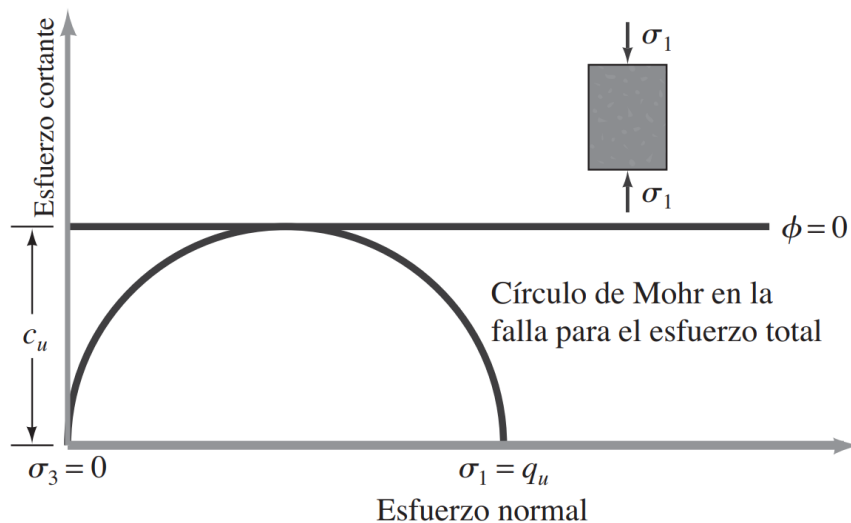


Figura 46. Círculo de Mohr de la prueba de compresión simple
Fuente: (Das, 2013)

Debido a que el suelo de estudio se encuentra en condición suelta, se requiere realizar un remoldeo tomando en cuenta la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo, obtenido en el ensayo de Proctor estándar (Tabla 18). Cabe mencionar que, se considera que las muestras remoldeadas presenten al menos el 95% de la densidad seca máxima y humedad óptima, para ser aceptadas a ensayar. A continuación, se detalla el proceso del ensayo.

Preparación de la muestra

- Se colocó a secar una muestra representativa del suelo, en el horno a $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas.
- Se extrajo la muestra seca del horno, dejándola en reposo hasta que su temperatura disminuya, de forma que cuando se mezcle con el agua, no ocurra evaporación de ésta.
- Se pesó el suelo para calcular la cantidad de agua requerida para alcanzar su humedad óptima.
- Se colocó ambos componentes juntos, y con ayuda de una pala se remueve hasta obtener una mezcla homogénea.
- Una vez mezclado el suelo, se procedió a realizar el remoldeo a partir del método de “Energía de compactación Harvard”, el cual consiste en aplicar una presión al suelo, con ayuda de un pistón, dentro de un molde con

dimensiones internas de 3.43 cm de diámetro y 7.21 cm de alto, cumpliendo así lo especificado en la ASTM D2166 de la relación entre el diámetro y la altura de la muestra 1 a 2, respectivamente. El remoldeo se realizó en 3 capas, aplicando una fuerza por medio de un émbolo calibrado con un resorte, utilizando un número de golpes entre 10 y 20 por capa, verificando que la muestra cumpla con la densidad seca máxima.



Figura 47. Remoldeo de muestra para ensayo de compresión Simple
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

- Con ayuda de un gato hidráulico extractor de muestras, se retiró el espécimen del molde.



Figura 48. Muestra de suelo remoldeada para ensayo de compresión Simple
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Procedimiento

- Con ayuda de un calibrador Vernier se tomaron 3 medidas de la muestra, tanto de su altura como del diámetro, para posteriormente obtener su promedio.
- Se colocó la muestra en la máquina de compresión simple, asegurándose que las superficies sean lisas en la parte superior e inferior para garantizar una aplicación uniforme de la carga en las secciones.
- Se configuró la máquina con una velocidad de aplicación de carga de 0.5 mm/min.
- Se encendió la máquina y se tomaron las lecturas del dial de carga para cada deformación establecida en la hoja de ensayo.



Figura 49. Ensayo de resistencia a la compresión simple
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

- Una vez que el espécimen llegó al punto de falla, se registró su peso húmedo y se lo llevó al horno a $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas, para posteriormente obtener su contenido de humedad.



Figura 50. Evidencia fotográfica de la muestra antes y después de realizar el ensayo de compresión simple.

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Los cálculos usados en este ensayo, de acuerdo con la norma mencionada previamente, se presenta a continuación.

La deformación axial unitaria se obtiene con la Ecuación 6.

Ecuación 6. Deformación axial unitaria

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Donde:

ΔL : variación de la altura de la muestra obtenida del deformímetro (mm)

L_0 : Altura inicial del espécimen (mm)

Se calcula un área corregida, debido a que la aplicación de cargas axiales genera una afectación en el área transversal.

Ecuación 7. Área transversal corregida

$$A_i = \frac{A_0}{1 - \varepsilon_i}$$

Donde:

A_i : Área transversal corregida (mm²)

A_0 : Área transversal inicial del espécimen (mm²)

ε_i : Deformación vertical unitaria correspondiente

El esfuerzo principal mayor (σ_3) se calcula con la Ecuación 8.

Ecuación 8. Esfuerzo principal mayor

$$\sigma_3 = \frac{P}{A_i}$$

P : Carga aplicada (KPa)

A_i : Área transversal corregida (mm²)

Este proceso de cálculo se realiza para cada deformación registrada (i) con su carga aplicada, de manera que se pueda generar una curva relacionando el esfuerzo (ordenadas) vs. Deformación unitaria (abscisas). A partir de la gráfica, se puede obtener el pico de la curva, siendo éste la resistencia máxima a la compresión no confinada (q_u).

Los informes de laboratorio correspondientes a este ensayo se presentan en el Anexo 3, siguiendo la norma ASTM D2166 para sus cálculos y procedimiento. En la Tabla 19 se presenta el resultado para el suelo natural.

Tabla 19

Deformación unitaria y esfuerzo máximo de la muestra de suelo natural

COMPRESIÓN SIMPLE EN SUELOS						
ASTM D2166; ASTM D854						
MUESTRA	Número	DEFORMACIÓN UNITARIA (mm)		ESFUERZO MÁXIMO (kg/cm ²)	ESFUERZO MÁXIMO (kN/m ²)	
Suelo Natural	1	2,2	1,97	0,379	37,17	35,14
Suelo Natural	2	2,0		0,317	31,09	
Suelo Natural	3	1,7		0,379	37,17	

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

De acuerdo con los resultados presentados previamente, se verifica que el suelo es de consistencia tipo blanda, de acuerdo con la clasificación presentada en la Tabla 3, con una resistencia a la compresión simple menor a 80 kN/m².

3.6.6. CORTE DIRECTO

Este ensayo determina la resistencia interna a la cizalladura que posee el suelo, por unidad de área; depende principalmente de características del suelo, tales como: la cohesión, fricción entre partículas, contenido de humedad y la presión del agua intersticial que presenta la masa (Das, 2013).

Se fundamenta en la teoría propuesta por Mohr, la cual define que la falla de una masa de suelo no se debe a un esfuerzo máximo normal o a un esfuerzo cortante, por sí solos, sino a una combinación de ambos, dándose una relación entre dichos esfuerzos sobre un plano de falla (Ecuación 9) (Das, 2013).

Ecuación 9. Resistencia cortante

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi$$

Donde:

τ_f : esfuerzo cortante en el plano de falla

σ : esfuerzo normal en el plano de falla

c : cohesión

ϕ : ángulo de fricción interna

A partir de la Ecuación 9 se puede definir la envolvente de falla de Mohr-Coulomb, la cual se asemeja a una línea recta inclinada, permitiendo así obtener el ángulo de fricción y la cohesión de la masa de suelo (ver Figura 51).

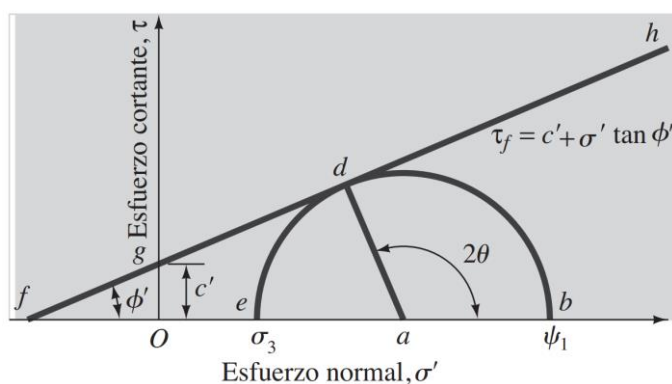


Figura 51. Envolvente de falla de Mohr-Coulomb
Fuente: (Das, 2013)

Este ensayo se realizó de acuerdo con los parámetros especificados en la norma ASTM D3080. Se detalla el proceso a continuación.

Preparación de la muestra

- Se colocó a secar una muestra representativa del suelo, en horno a $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas.
- Se extrajo la muestra seca del horno, dejándola en reposo hasta que su temperatura disminuya, de forma que cuando se mezcle con el agua, no ocurra la evaporación de ésta.



Figura 52. Suelo natural seco para ensayo de corte directo
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

- Se pesó el suelo para calcular la cantidad de agua requerida, y así alcanzar su humedad óptima.
- Se colocó ambos componentes juntos, y con ayuda de una pala se mezcló hasta obtener una distribución homogénea.



Figura 53. Suelo mezclado en humedad óptima para ensayo de corte directo
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

- Una vez mezclado el suelo, se procedió a realizar el remoldeo en un molde con dimensiones de 101.6 mm de diámetro y una altura de 116.43 mm; esto compactando en 3 capas junto con un martillo con el cual se aplicó un peso de 24.4 N a caída libre, a una altura de 304.8 mm, dando un número de golpes entre 15 y 25, según lo requerido, para cumplir con la densidad seca máxima. Al igual que el remoldeo para la resistencia a compresión simple, se debe verificar que la densidad seca cumpla con al menos el 95% del valor obtenido en el ensayo de Proctor estándar.



Figura 54. Remoldeo de muestra para ensayo de corte directo
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

- Con ayuda de un gato hidráulico extractor de muestras, se retiró el espécimen del molde.



Figura 55. Muestra de suelo remoldeada para ensayo de corte directo
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Procedimiento

- Con la muestra remoldeada, se procedió a tallarla, tomando en cuenta el diámetro y altura de los anillos de la máquina de corte directo, pues estos deben entrar a presión. El diámetro de las muestras talladas fue de 7.5 cm con 8 cm de altura, y se usó dos anillos con una separación de 5 mm entre ellos. Este paso se lo realizó con mucho cuidado, para no generar rupturas de la muestra previo al ensayo. Ver Figura 56.



Figura 56. Tallado de muestra para ensayo de corte directo
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

- Se colocó la muestra tallada con los anillos en la máquina de corte directo.



Figura 57. Colocación de muestra en máquina de corte directo
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

- Se preparó la máquina de corte directo mediante la fijación del anillo inferior, pues éste no tendrá desplazamiento; se colocó el cabezal en el anillo superior y sobre éste se aplicó el esfuerzo normal. Se pone en contacto el deformímetro y el dial de carga, en los lados laterales del anillo superior; de esta manera se aplicó una fuerza horizontal inicial a velocidad constante generando el plano de falla predefinido por la separación de los anillos.



Figura 58. Máquina de corte directo ensamblada con muestra
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

- Se encendió la máquina, configurando la velocidad lo más cercana a cero, y se tomó las lecturas del dial de carga en las deformaciones laterales representativas, para su posterior análisis.

- Una vez que se alcanzó la falla del espécimen, se colocó en una cápsula, tomando su peso húmedo y llevándolo al horno para así obtener su contenido de humedad.



Figura 59. Falla en muestra por ensayo de corte directo
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Los esfuerzos normales considerados en el ensayo fueron de 0.5, 1.0 y 2.0 kg/cm², para cada muestra, tanto en las muestras naturales como en las estabilizadas, ver Figura 60, 61 y 62.



Figura 60. Ensayo de Corte Directo en suelo natural con esfuerzo normal de 0.5 kg/cm².

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)



Figura 61. Ensayo de Corte Directo en suelo natural con esfuerzo normal de 1.0 kg/cm².

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)



Figura 62. Ensayo de Corte Directo en suelo natural con esfuerzo normal de 2.0 kg/cm².

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Los cálculos usados en este ensayo, de acuerdo con la norma mencionada previamente, se presenta a continuación.

Para obtener el esfuerzo cortante se usa la Ecuación 10.

Ecuación 10. Esfuerzo cortante

$$\tau = \frac{F_s}{A}$$

Donde:

τ : esfuerzo cortante nominal

F_s : Fuerza horizontal cortante

A : área de la sección transversal de la muestra

El esfuerzo normal se obtiene con la Ecuación 11.

Ecuación 11. Esfuerzo normal

$$\sigma_n = \frac{F_n}{A}$$

Donde:

σ_n : esfuerzo normal nominal

F_n : Fuerza normal

A : área de la sección transversal de la muestra

En la Figura 63 se presenta la Envolvente de falla de Mohr-Coulomb obtenida al realizar el ensayo de corte directo en el suelo natural.

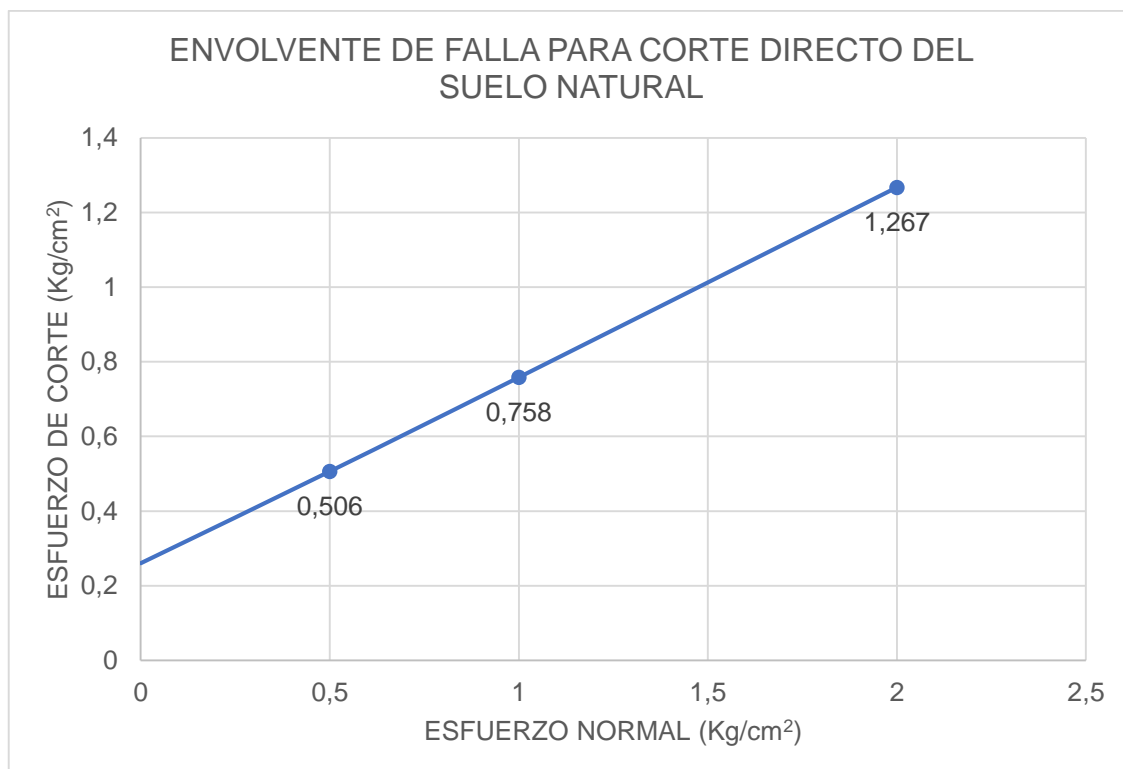


Figura 63. Envolvente de falla de Mohr-Coulomb del ensayo de corte directo en el suelo natural

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Los informes de laboratorio correspondientes a este ensayo se presentan en el Anexo 4, siguiendo la norma ASTM D3080 para sus cálculos y procedimiento. En la Tabla 20 se presenta el resultado del suelo natural.

Tabla 20

Ensayo de corte directo de la muestra de suelo natural

CORTE DIRECTO EN SUELOS		
ASTM D3080		
SUELO NATURAL		
MUESTRA	COHESIÓN (kg/cm ²)	ÁNGULO DE FRICCIÓN (°)
Suelo Natural	0,26	26,57

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

3.7. ENSAYOS EN CENIZAS VOLCÁNICAS

3.7.1. DIFRACCIÓN DE RAYOS X

La difracción por rayos X permite obtener una caracterización mineralógica de los materiales, a partir de la identificación de los compuestos cristalinos, ya que cada sustancia tiene un patrón único de difracción (Aparicio & Carbajar, 2010).

Para este ensayo, es requerido tener la muestra molida, de manera que se obtenga un polvo homogéneo de partículas finas, lo que genera que los cristales se orienten en todas las direcciones con la mayor cantidad de posiciones interplanares. Es así como, al momento de ser atravesados por un haz de rayos X formando un ángulo con la superficie cristalina, una porción en la capa de la superficie pueda difundirse y la otra penetrar hacia una segunda capa de átomos, produciéndose el mismo principio en las siguientes capas de manera acumulativa, dándose así la difracción (Skoog et al., 2007). En la Figura 64 se presenta una simulación de este fundamento, conocido como la “Ley de Bragg”

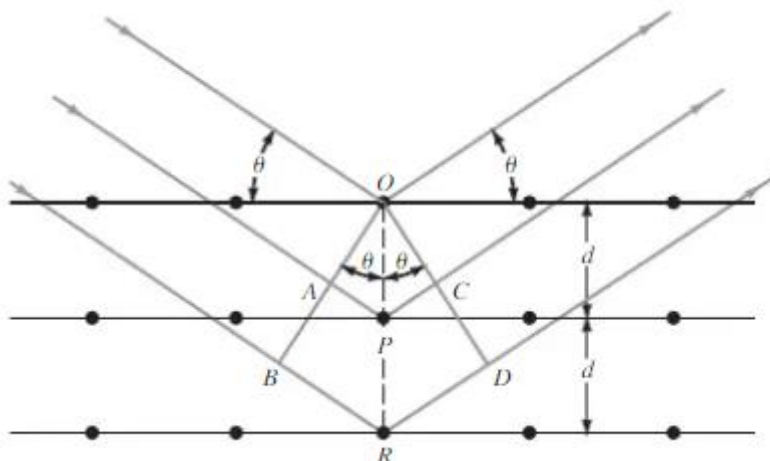


Figura 64. Difracción de rayos X por medio de un cristal
Fuente: (Skoog et al., 2007)

En la Ecuación 12 se evidencia la estrecha relación de los ángulos de desviación con la distancia entre los planos de átomos del material.

Ecuación 12. Ecuación de Bragg

$$n\lambda = 2d \cdot \sin \theta$$

Donde:

n: número entero (orden de reflexión)

λ : longitud de onda de los rayos X

d: distancia entre los planos de átomos paralelos

θ : ángulo formado con el plano atómico

El resultado de este ensayo es un difractograma o diagramas de difracción, los cuales se obtiene con la ayuda de dispositivos automáticos donde se ingresa la muestra pulverizada y, junto con una fuente de rayos X, se genera la difracción para después ser registrada a partir de un barrido automático. Este diagrama se fundamenta en los ángulos de difracción (θ o 2θ) y las intensidades relativas, calculándose así la distancia entre las familias de planos de átomos, y permitiendo definir a qué sistema cristalino pertenece cada compuesto (Skoog et al., 2007).

En las Figuras 65, 66 y 67 se presenta los difractogramas correspondientes a las cenizas volcánicas.

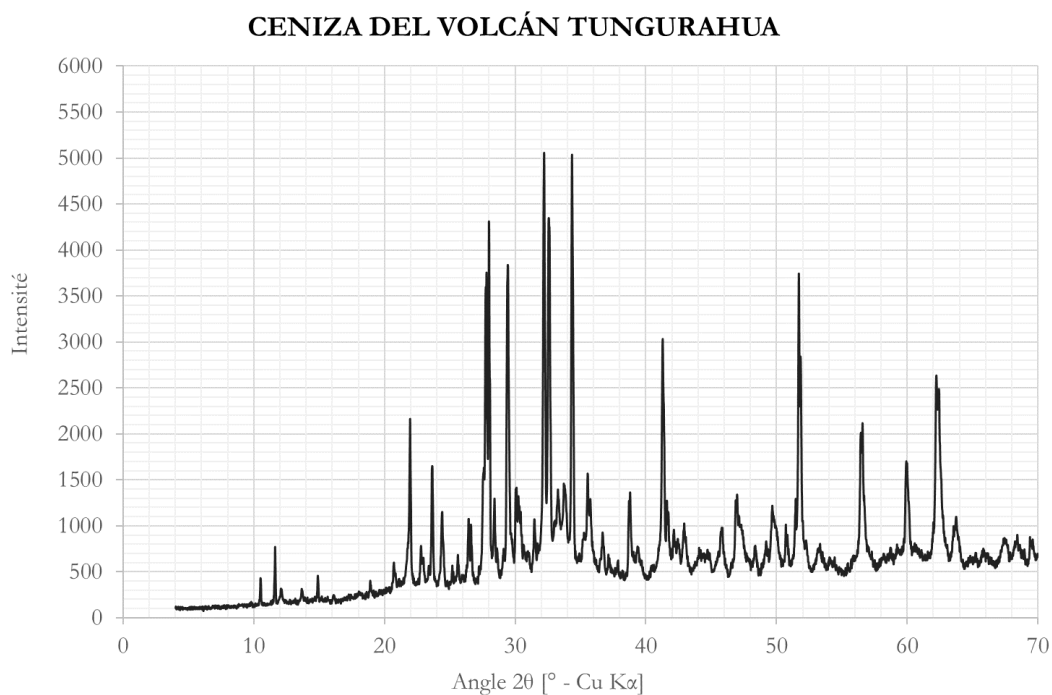


Figura 65. Difractograma de la ceniza del volcán Tungurahua
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

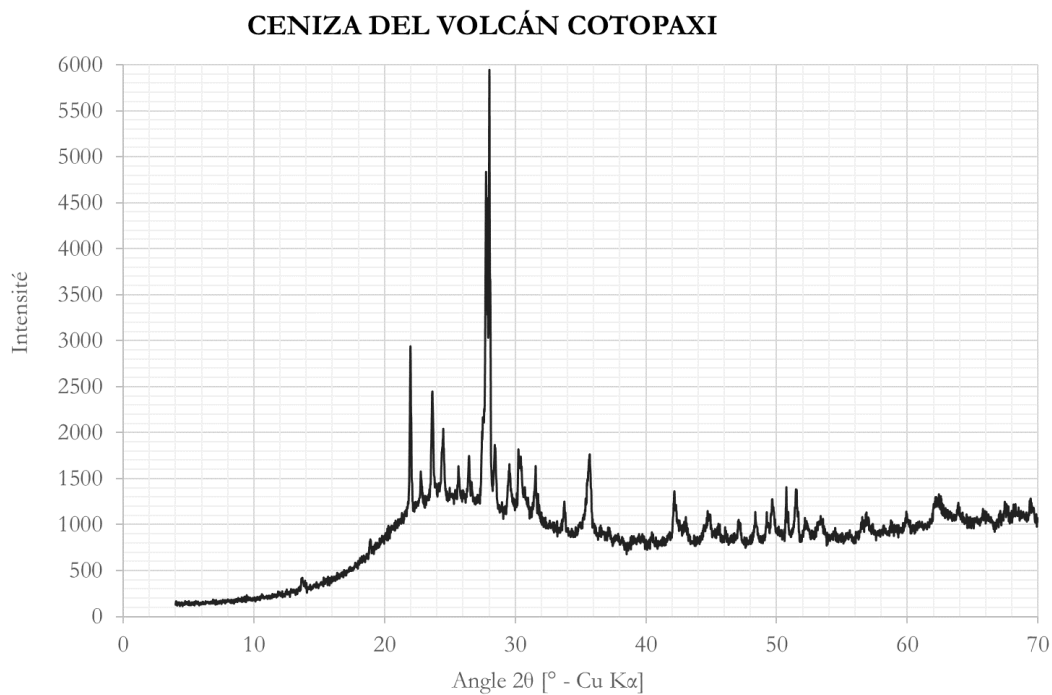


Figura 66. Difractograma de la ceniza del volcán Cotopaxi
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

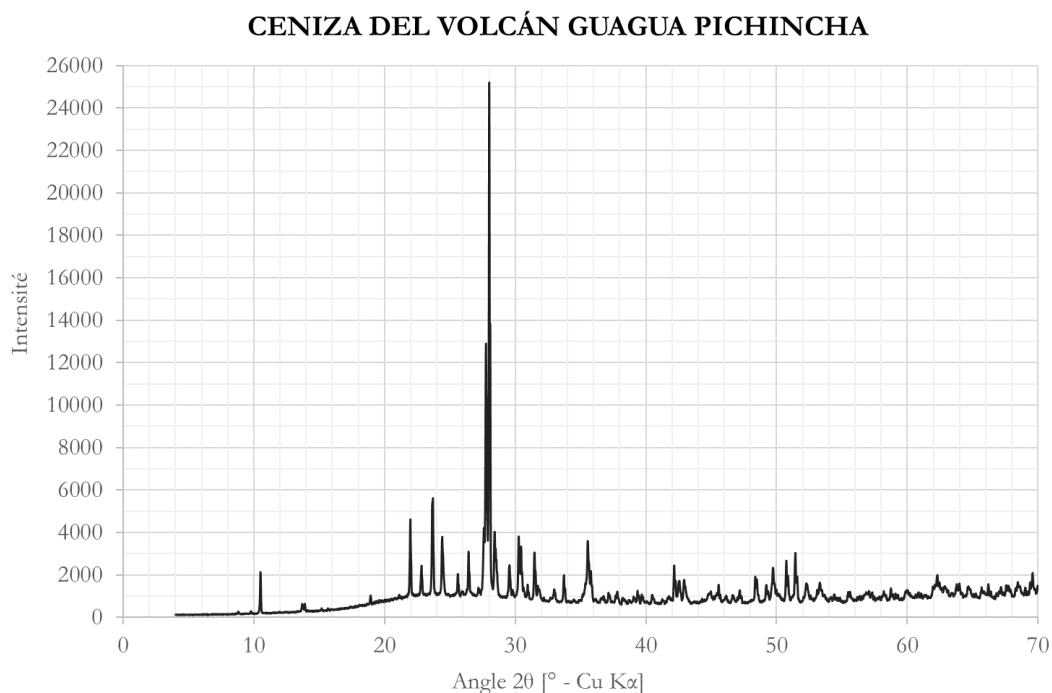


Figura 67. Difractograma de la ceniza del volcán Guagua Pichincha
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

En la Tabla 21 se presenta el resultado para las cenizas volcánicas.

Tabla 21

Resultados del ensayo de difracción de rayos X de las cenizas del volcán Cotopaxi, Tungurahua y Guagua Pichincha

ÓXIDO	FÓRMULA	CENIZA DEL VOLCÁN COTOPAXI (%)	CENIZA DEL VOLCÁN GUAGUA PICHINCHA (%)	CENIZA DEL VOLCÁN TUNGURAHUA (%)
Óxido de calcio	CaO	5	7	2
Óxido de silicio	SiO ₂	62	59	73
Óxido de aluminio	Al ₂ O ₃	18	20	14
Óxido de hierro (III)	Fe ₂ O ₃	6	5	2
Óxido de magnesio	MgO	2	2	-
Óxido de sodio	Na ₂ O	4	5	4
Óxido de potasio	K ₂ O	2	1	3
Óxido de titanio (IV)	TiO ₂	1	-	-

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

3.7.2. TERMOGRAVIMETRÍA

La termogravimetría se usa para caracterizar los materiales a partir de la exposición hacia cambios de temperatura controladas, de manera que se reconozca y cuantifique las alteraciones físicas y químicas que ocurren (Rodríguez & Villegas, 2012). Las variaciones de masa ocurridas en el proceso se consideran como efecto de las reacciones de descomposición y oxidación, así como de los procesos de evaporación y sublimación (Skoog et al., 2007).

En este análisis se obtiene un registro de la masa conforme se va aumentando la temperatura, comúnmente de manera lineal, dando como resultado una gráfica conocida como termograma o curva de descomposición térmica. Entre las aplicaciones que presenta, está la identificación de ciertos minerales, los cuales se pueden determinar debido a los patrones de descomposición que tiene cada componente (Skoog et al., 2007).

A partir de los datos registrados, se puede obtener dos tipos de curva que tracen la variación de la masa del espécimen; la curva TG, representa la pérdida o ganancia de masa en función de la temperatura; y la curva derivada termogravimétrica (DTG), la cual es de suma importancia cuando existen pérdidas mínimas, puesto que la información presentada es la velocidad de variación de la masa (Hidalgo, 2018).

El ensayo de termogravimetría fue realizado en el Departamento de Metalurgia Extractiva (DEMEX), efectuado en un equipo Perkin Elmer STA 8000 (Figura 68), bajo los siguientes parámetros:

- Gas: Nitrógeno
- Flujo de aire: 20mL/min
- Velocidad de calentamiento: 10°C/min
- Rango de temperaturas: 4°C a 900°C

Y con un método de calentamiento, que consistió en tres etapas.

- Primera etapa: isotérmica a 40°C por 5 minutos
- Segunda etapa: Rampa de calentamiento de 40°C hasta los 900°C
- Tercera etapa: isotérmica a 900°C por 10 minutos



Figura 68. Equipo Perkin Elmer STA 8000
Fuente: (PerkinElmer, n.d.)

Con los parámetros descritos anteriormente, se identificó y cuantificó los procesos de deshidratación de las muestras de cenizas volcánicas. Previo al ensayo, las muestras fueron molidas hasta tener un material homogéneo y posteriormente cribadas por el tamiz #200.

En las Figuras 69, 70 y 71 se presentan los termogramas resultantes del ensayo para cada ceniza volcánica.

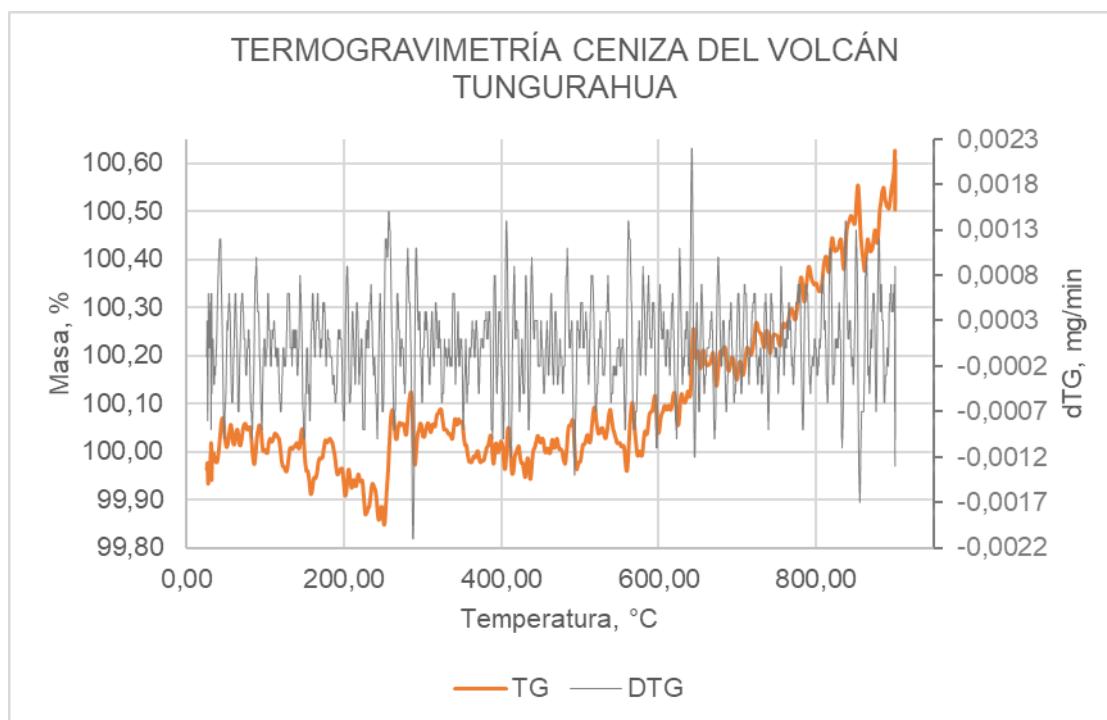


Figura 69. Termograma de la ceniza del volcán Tungurahua
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

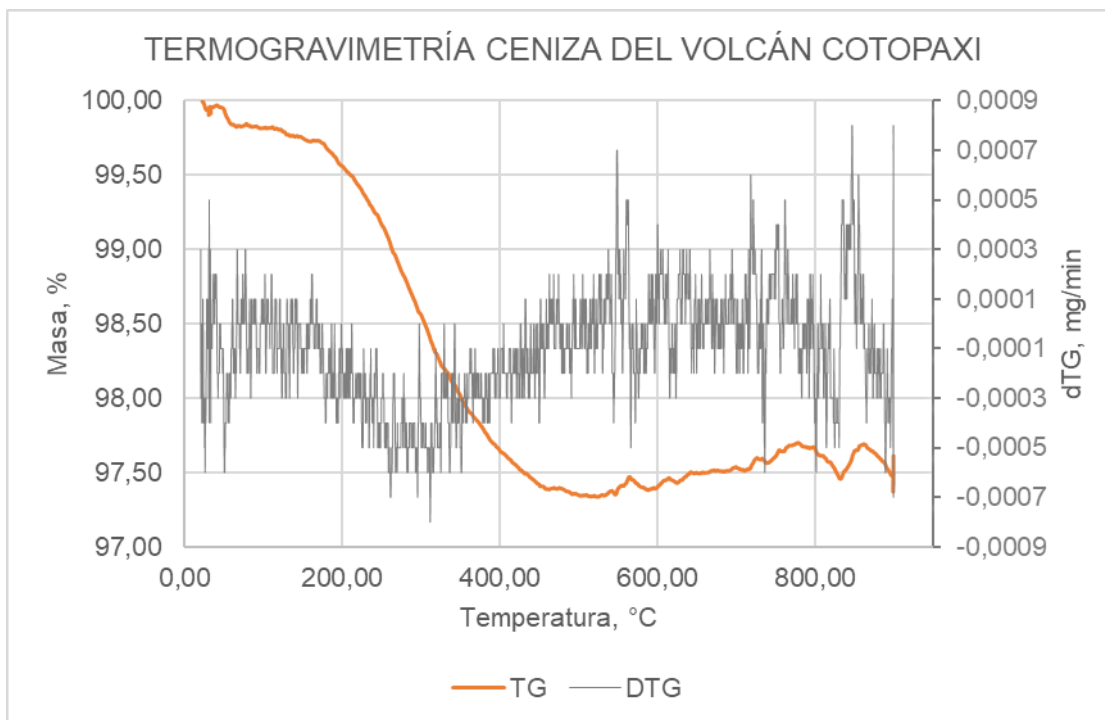


Figura 70. Termograma de la ceniza del volcán Cotopaxi
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

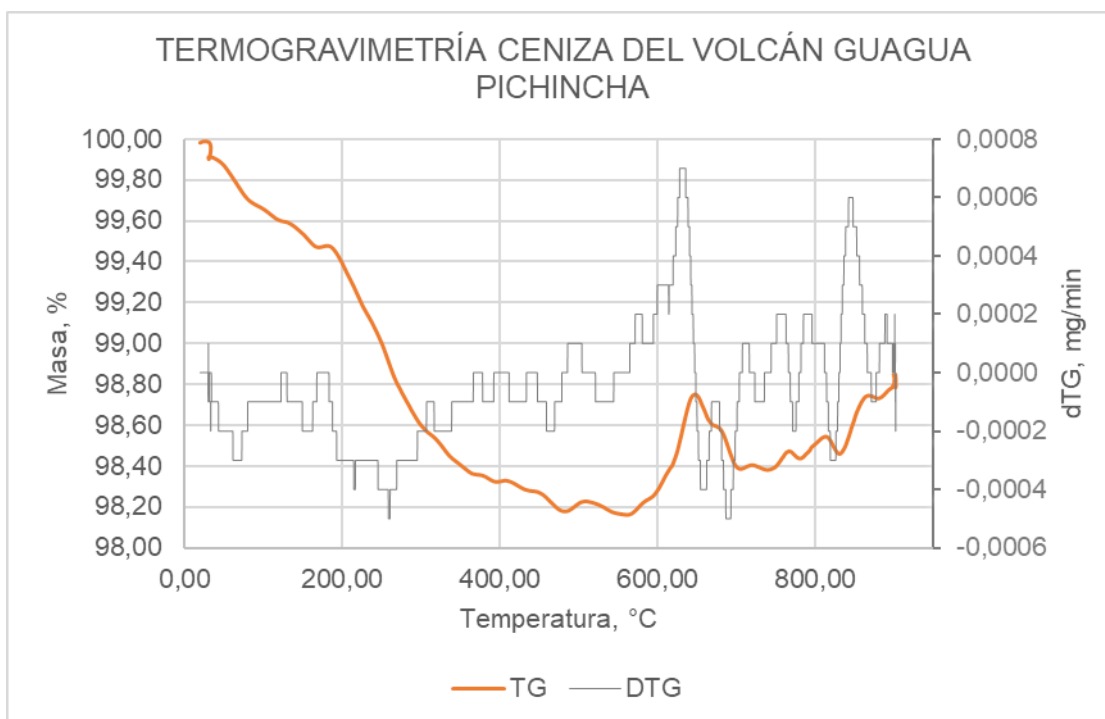


Figura 71. Termograma de la ceniza del volcán Guagua Pichincha
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

3.8. ENSAYOS EN MUESTRAS DE SUELO ESTABILIZADO

Los ensayos realizados a las muestras estabilizadas con las tres cenizas volcánicas (Cotopaxi, Guagua Pichincha y Tungurahua) junto con los activadores puzolánicos descritos previamente, se presentan en la siguiente parte de la investigación, con su respectiva nomenclatura basada en las dosificaciones establecidas en la Tabla 12.

3.8.1. PROCTOR ESTÁNDAR

Los informes de laboratorio correspondientes a estos ensayos se presentan en el Anexo 5. En las Tablas 22, 23 y 24 se muestran los resultados del ensayo de Proctor estándar para el suelo estabilizado con las cenizas volcánicas y los activadores puzolánicos.

Tabla 22

Densidad seca máxima y humedad óptima de muestras estabilizadas con ceniza del volcán Cotopaxi

COMPACTACIÓN PROCTOR ESTÁNDAR		
ASTM D698		
GENIZA DEL VOLCÁN COTOPAXI		
MUESTRA	DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm ³)	HUMEDAD ÓPTIMA (%)
VC3-Ce2	1,540	13,4
VC3-Ce3	1,532	15,3
VC3-Ca2	1,546	18,8
VC3-Ca3	1,530	15,7
VC3-Hi2	1,617	13,9
VC3-Hi3	1,517	18,5
VC6-Ce2	1,546	14,0
VC6-Ce3	1,534	14,7
VC6-Ca2	1,450	16,7
VC6-Ca3	1,530	17,2
VC6-Hi2	1,593	14,3
VC6-Hi3	1,572	14,1

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Tabla 23

Densidad seca máxima y humedad óptima de muestras estabilizadas con ceniza del volcán Tungurahua

COMPACTACIÓN PROCTOR ESTÁNDAR		
ASTM D698		
CENIZA DEL VOLCÁN TUNGURAHUA		
MUESTRA	DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm³)	HUMEDAD ÓPTIMA (%)
VT3-Ce2	1,568	17,5
VT3-Ce3	1,526	18,4
VT3-Ca2	1,507	18,1
VT3-Ca3	1,566	16,4
VT3-Hi2	1,591	17,9
VT3-Hi3	1,589	16,2
VT6-Ce2	1,511	16,6
VT6-Ce3	1,552	16,6
VT6-Ca2	1,528	18,1
VT6-Ca3	1,538	18,2
VT6-Hi2	1,579	16,3
VT6-Hi3	1,585	16,8

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Tabla 24

Densidad seca máxima y humedad óptima de muestras estabilizadas con ceniza del volcán Guagua Pichincha

COMPACTACIÓN PROCTOR ESTÁNDAR		
ASTM D698		
CENIZA DEL VOLCÁN GUAGUA PICHINCHA		
MUESTRA	DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm³)	HUMEDAD ÓPTIMA (%)
VP3-Ce2	1,554	17,9
VP3-Ce3	1,566	16,7
VP3-Ca2	1,526	18,4
VP3-Ca3	1,505	17,7
VP3-Hi2	1,558	16,3
VP3-Hi3	1,574	16,2
VP6-Ce2	1,550	17,3
VP6-Ce3	1,564	16,7
VP6-Ca2	1,536	18,9
VP6-Ca3	1,536	17,2
VP6-Hi2	1,556	16,5
VP6-Hi3	1,519	17,5

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

3.8.2. COMPRESIÓN SIMPLE

Los informes de laboratorio correspondientes a estos ensayos se presentan en el Anexo 6. En las Tablas de la 25 a la 37 se presentan los resultados del ensayo de compresión simple para el suelo estabilizado con las cenizas volcánicas y los activadores puzolánicos.

Tabla 25

Deformación unitaria máxima y esfuerzo máximo de las muestras estabilizadas con ceniza del volcán Cotopaxi al 3% curadas por 28 días

COMPRESIÓN SIMPLE EN SUELOS				
ASTM D2166; ASTM D854				
CENIZA DEL VOLCÁN COTOPAXI 3%				
MUESTRA	DEFORMACIÓN UNITARIA (mm)		ESFUERZO MÁXIMO (kN/m ²)	
VC3-Ce2 (1) 28 D	1,20	1,37	387,159	351,785
VC3-Ce2 (2) 28 D	1,10		301,547	
VC3-Ce2 (3) 28 D	1,80		366,650	
VC3-Ce3 (1) 28 D	3,00	2,10	1133,189	1124,732
VC3-Ce3 (2) 28 D	1,50		1158,835	
VC3-Ce3 (3) 28 D	1,80		1082,171	
VC3-Ca2 (1) 28 D	2,20	2,10	3472,927	3091,562
VC3-Ca2 (2) 28 D	1,90		2809,329	
VC3-Ca2 (3) 28 D	2,20		2992,430	
VC3-Ca3 (1) 28 D	2,20	2,27	3406,373	3558,872
VC3-Ca3 (2) 28 D	2,20		3702,842	
VC3-Ca3 (3) 28 D	2,40		3567,402	
VC3-Hi2 (1) 28 D	1,40	1,33	397,766	426,945
VC3-Hi2 (2) 28 D	1,30		441,224	
VC3-Hi2 (3) 28 D	1,30		441,846	
VC3-Hi3 (1) 28 D	1,80	1,93	524,047	535,734
VC3-Hi3 (2) 28 D	2,20		533,955	
VC3-Hi3 (3) 28 D	1,80		549,199	

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Tabla 26

Deformación unitaria máxima y esfuerzo máximo de las muestras estabilizadas con ceniza del volcán Cotopaxi al 6% curadas por 28 días

COMPRESIÓN SIMPLE EN SUELOS				
ASTM D2166; ASTM D854				
CENIZA DEL VOLCÁN COTOPAXI 6%				
MUESTRA	DEFORMACIÓN UNITARIA (mm)		ESFUERZO MÁXIMO (kN/m²)	
VC6-Ce2 (1) 28 D	1,40	1,37	417,299	442,073
VC6-Ce2 (2) 28 D	1,40		423,436	
VC6-Ce2 (3) 28 D	1,30		485,485	
VC6-Ce3 (1) 28 D	1,60	1,73	1450,270	1523,358
VC6-Ce3 (2) 28 D	1,90		1594,253	
VC6-Ce3 (3) 28 D	1,70		1525,552	
VC6-Ca2 (1) 28 D	2,40	2,23	2545,979	2591,127
VC6-Ca2 (2) 28 D	2,40		2630,442	
VC6-Ca2 (3) 28 D	1,90		2596,961	
VC6-Ca3 (1) 28 D	2,00	2,67	2756,859	2763,938
VC6-Ca3 (2) 28 D	3,00		2855,326	
VC6-Ca3 (3) 28 D	3,00		2679,629	
VC6-Hi2 (1) 28 D	1,20	1,40	455,397	449,392
VC6-Hi2 (2) 28 D	1,50		422,244	
VC6-Hi2 (3) 28 D	1,50		470,535	
VC6-Hi3 (1) 28 D	1,60	1,77	598,016	621,539
VC6-Hi3 (2) 28 D	1,90		658,106	
VC6-Hi3 (3) 28 D	1,80		608,494	

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Tabla 27

Deformación unitaria máxima y esfuerzo máximo de las muestras estabilizadas con ceniza del volcán Cotopaxi al 3% curadas por 56 días

COMPRESIÓN SIMPLE EN SUELOS				
ASTM D2166; ASTM D854				
CENIZA DEL VOLCÁN COTOPAXI 3%				
MUESTRA	DEFORMACIÓN UNITARIA (mm)		ESFUERZO MÁXIMO (kN/m²)	
VC3-Ce2 (1) 56 D	1,40	1,73	539,274	488,775
VC3-Ce2 (2) 56 D	2,20		437,494	
VC3-Ce2 (3) 56 D	1,60		489,558	
VC3-Ce3 (1) 56 D	1,80	1,63	1428,505	1542,917
VC3-Ce3 (2) 56 D	1,40		1578,496	
VC3-Ce3 (3) 56 D	1,70		1621,749	
VC3-Ca2 (1) 56 D	2,40	2,33	3592,058	3837,465
VC3-Ca2 (2) 56 D	2,20		3769,396	
VC3-Ca2 (3) 56 D	2,40		4150,940	
VC3-Ca3 (1) 56 D	3,20	3,20	4483,867	4413,340
VC3-Ca3 (2) 56 D	3,40		4335,197	
VC3-Ca3 (3) 56 D	3,00		4420,956	
VC3-Hi2 (1) 56 D	1,80	1,60	506,483	534,472
VC3-Hi2 (2) 56 D	1,50		514,761	
VC3-Hi2 (3) 56 D	1,50		582,171	
VC3-Hi3 (1) 56 D	1,70	1,60	635,528	639,477
VC3-Hi3 (2) 56 D	1,50		664,836	
VC3-Hi3 (3) 56 D	1,60		618,067	

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Tabla 28

Deformación unitaria máxima y esfuerzo máximo de las muestras estabilizadas con ceniza del volcán Cotopaxi al 6% curadas por 56 días

COMPRESIÓN SIMPLE EN SUELOS				
ASTM D2166; ASTM D854				
CENIZA DEL VOLCÁN COTOPAXI 6%				
MUESTRA	DEFORMACIÓN UNITARIA (mm)		ESFUERZO MÁXIMO (kN/m²)	
VC6-Ce2 (1) 56 D	1,50	1,47	520,890	537,243
VC6-Ce2 (2) 56 D	1,60		537,754	
VC6-Ce2 (3) 56 D	1,30		553,084	
VC6-Ce3 (1) 56 D	1,40	1,67	1902,392	1958,513
VC6-Ce3 (2) 56 D	1,60		2016,578	
VC6-Ce3 (3) 56 D	2,00		1956,569	
VC6-Ca2 (1) 56 D	2,60	2,33	2974,331	3023,799
VC6-Ca2 (2) 56 D	2,20		3067,550	
VC6-Ca2 (3) 56 D	2,20		3029,515	
VC6-Ca3 (1) 56 D	3,60	3,33	4458,986	4459,041
VC6-Ca3 (2) 56 D	3,20		4372,340	
VC6-Ca3 (3) 56 D	3,20		4545,798	
VC6-Hi2 (1) 56 D	1,40	1,43	497,077	505,003
VC6-Hi2 (2) 56 D	1,60		520,156	
VC6-Hi2 (3) 56 D	1,30		497,776	
VC6-Hi3 (1) 56 D	1,80	1,63	712,948	695,962
VC6-Hi3 (2) 56 D	1,60		684,414	
VC6-Hi3 (3) 56 D	1,50		690,525	

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Tabla 29

Deformación unitaria máxima y esfuerzo máximo de las muestras estabilizadas con ceniza del volcán Tungurahua al 3% curadas por 28 días

COMPRESIÓN SIMPLE EN SUELOS				
ASTM D2166; ASTM D854				
CENIZA DEL VOLCÁN TUNGURAHUA 3%				
MUESTRA	DEFORMACIÓN UNITARIA (mm)		ESFUERZO MÁXIMO (kN/m²)	
VT3-Ce2 (1) 28 D	1,50	1,57	160,541	143,821
VT3-Ce2 (2) 28 D	1,50		147,776	
VT3-Ce2 (3) 28 D	1,70		123,147	
VT3-Ce3 (1) 28 D	1,60	1,70	1175,588	1111,744
VT3-Ce3 (2) 28 D	1,80		1192,250	
VT3-Ce3 (3) 28 D	1,70		967,395	
VT3-Ca2 (1) 28 D	2,20	1,73	2093,345	2063,546
VT3-Ca2 (2) 28 D	1,50		2178,488	
VT3-Ca2 (3) 28 D	1,50		1918,804	
VT3-Ca3 (1) 28 D	2,20	2,47	2897,732	2851,712
VT3-Ca3 (2) 28 D	2,60		2929,414	
VT3-Ca3 (3) 28 D	2,60		2727,990	
VT3-Hi2 (1) 28 D	1,60	1,67	196,100	236,470
VT3-Hi2 (2) 28 D	1,40		257,743	
VT3-Hi2 (3) 28 D	2,00		255,567	
VT3-Hi3 (1) 28 D	1,20	1,27	490,940	502,983
VT3-Hi3 (2) 28 D	1,10		516,212	
VT3-Hi3 (3) 28 D	1,50		501,797	

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Tabla 30

Deformación unitaria máxima y esfuerzo máximo de las muestras estabilizadas con ceniza del volcán Tungurahua al 6% curadas por 28 días

COMPRESIÓN SIMPLE EN SUELOS				
ASTM D2166; ASTM D854				
CENIZA DEL VOLCÁN TUNGURAHUA 6%				
MUESTRA	DEFORMACIÓN UNITARIA (mm)		ESFUERZO MÁXIMO (kN/m²)	
VT6-Ce2 (1) 28 D	2,00	1,53	286,804	310,533
VT6-Ce2 (2) 28 D	1,80		378,872	
VT6-Ce2 (3) 28 D	0,80		265,922	
VT6-Ce3 (1) 28 D	2,00	1,93	1337,490	1243,563
VT6-Ce3 (2) 28 D	1,90		1243,747	
VT6-Ce3 (3) 28 D	1,90		1149,451	
VT6-Ca2 (1) 28 D	2,00	2,33	1833,294	2110,494
VT6-Ca2 (2) 28 D	2,60		2280,554	
VT6-Ca2 (3) 28 D	2,40		2217,633	
VT6-Ca3 (1) 28 D	1,80	2,33	2666,610	2621,411
VT6-Ca3 (2) 28 D	2,60		2589,867	
VT6-Ca3 (3) 28 D	2,60		2607,755	
VT6-Hi2 (1) 28 D	1,80	1,43	335,146	338,933
VT6-Hi2 (2) 28 D	1,30		343,658	
VT6-Hi2 (3) 28 D	1,20		337,996	
VT6-Hi3 (1) 28 D	1,50	1,57	391,647	403,687
VT6-Hi3 (2) 28 D	1,60		421,648	
VT6-Hi3 (3) 28 D	1,60		397,766	

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Tabla 31

Deformación unitaria máxima y esfuerzo máximo de las muestras estabilizadas con ceniza del volcán Tungurahua al 3% curadas por 56 días

COMPRESIÓN SIMPLE EN SUELOS				
ASTM D2166; ASTM D854				
CENIZA DEL VOLCÁN TUNGURAHUA 3%				
MUESTRA	DEFORMACIÓN UNITARIA (mm)		ESFUERZO MÁXIMO (kN/m²)	
VT3-Ce2 (1) 56 D	1,70	1,80	232,993	261,330
VT3-Ce2 (2) 56 D	1,80		293,477	
VT3-Ce2 (3) 56 D	1,90		257,519	
VT3-Ce3 (1) 56 D	2,00	2,03	1518,103	1480,098
VT3-Ce3 (2) 56 D	1,90		1420,555	
VT3-Ce3 (3) 56 D	2,20		1501,637	
VT3-Ca2 (1) 56 D	2,00	2,13	2466,978	2424,789
VT3-Ca2 (2) 56 D	2,20		2438,309	
VT3-Ca2 (3) 56 D	2,20		2369,081	
VT3-Ca3 (1) 56 D	2,80	2,87	3900,685	3869,228
VT3-Ca3 (2) 56 D	3,00		3739,633	
VT3-Ca3 (3) 56 D	2,80		3967,367	
VT3-Hi2 (1) 56 D	1,80	1,83	317,764	333,933
VT3-Hi2 (2) 56 D	1,50		367,169	
VT3-Hi2 (3) 56 D	2,20		316,866	
VT3-Hi3 (1) 56 D	1,30	1,30	660,903	649,528
VT3-Hi3 (2) 56 D	1,50		673,142	
VT3-Hi3 (3) 56 D	1,10		614,538	

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Tabla 32

Deformación unitaria máxima y esfuerzo máximo de las muestras estabilizadas con ceniza del volcán Tungurahua al 6% curadas por 56 días

COMPRESIÓN SIMPLE EN SUELOS				
ASTM D2166; ASTM D854				
CENIZA DEL VOLCÁN TUNGURAHUA 6%				
MUESTRA	DEFORMACIÓN UNITARIA (mm)		ESFUERZO MÁXIMO (kN/m²)	
VT6-Ce2 (1) 56 D	2,80	2,47	361,987	370,683
VT6-Ce2 (2) 56 D	3,00		370,654	
VT6-Ce2 (3) 56 D	1,60		379,408	
VT6-Ce3 (1) 56 D	1,90	1,85	1570,740	1516,447
VT6-Ce3 (2) 56 D	1,50		1461,332	
VT6-Ce3 (3) 56 D	2,14		1517,270	
VT6-Ca2 (1) 56 D	1,90	2,00	2746,519	2815,335
VT6-Ca2 (2) 56 D	2,20		2873,976	
VT6-Ca2 (3) 56 D	1,90		2825,511	
VT6-Ca3 (1) 56 D	2,40	2,10	3288,101	3183,588
VT6-Ca3 (2) 56 D	2,00		3112,749	
VT6-Ca3 (3) 56 D	1,90		3149,913	
VT6-Hi2 (1) 56 D	1,40	1,40	441,224	486,181
VT6-Hi2 (2) 56 D	1,50		489,558	
VT6-Hi2 (3) 56 D	1,30		527,760	
VT6-Hi3 (1) 56 D	1,80	2,00	548,421	515,214
VT6-Hi3 (2) 56 D	2,40		496,840	
VT6-Hi3 (3) 56 D	1,80		500,381	

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Tabla 33

Deformación unitaria máxima y esfuerzo máximo de las muestras estabilizadas con ceniza del volcán Guagua Pichincha al 3% curadas por 28 días

COMPRESIÓN SIMPLE EN SUELOS				
ASTM D2166; ASTM D854				
CENIZA DEL VOLCÁN GUAGUA PICHINCHA 3%				
MUESTRA	DEFORMACIÓN UNITARIA (mm)		ESFUERZO MÁXIMO (kN/m²)	
VP3-Ce2 (1) 28 D	1,80	1,63	427,763	430,395
VP3-Ce2 (2) 28 D	1,60		458,964	
VP3-Ce2 (3) 28 D	1,50		404,458	
VP3-Ce3 (1) 28 D	2,00	2,00	2260,047	2281,228
VP3-Ce3 (2) 28 D	2,00		2359,685	
VP3-Ce3 (3) 28 D	2,00		2223,951	
VP3-Ca2 (1) 28 D	2,20	2,13	2250,388	2245,520
VP3-Ca2 (2) 28 D	2,20		2256,422	
VP3-Ca2 (3) 28 D	2,00		2229,751	
VP3-Ca3 (1) 28 D	2,40	2,47	3125,159	3274,791
VP3-Ca3 (2) 28 D	2,40		3350,831	
VP3-Ca3 (3) 28 D	2,60		3348,384	
VP3-Hi2 (1) 28 D	1,40	1,40	477,996	477,559
VP3-Hi2 (2) 28 D	1,30		490,256	
VP3-Hi2 (3) 28 D	1,50		464,424	
VP3-Hi3 (1) 28 D	1,80	1,47	536,234	512,149
VP3-Hi3 (2) 28 D	1,30		473,194	
VP3-Hi3 (3) 28 D	1,30		527,018	

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Tabla 34

Deformación unitaria máxima y esfuerzo máximo de las muestras estabilizadas con ceniza del volcán Guagua Pichincha al 6% curadas por 28 días

COMPRESIÓN SIMPLE EN SUELOS				
ASTM D2166; ASTM D854				
CENIZA DEL VOLCÁN GUAGUA PICHINCHA 6%				
MUESTRA	DEFORMACIÓN UNITARIA (mm)		ESFUERZO MÁXIMO (kN/m²)	
VP6-Ce2 (1) 28 D	2,40	2,33	421,117	391,377
VP6-Ce2 (2) 28 D	2,40		397,053	
VP6-Ce2 (3) 28 D	2,20		355,960	
VP6-Ce3 (1) 28 D	2,20	2,20	2268,928	1938,275
VP6-Ce3 (2) 28 D	2,20		1734,225	
VP6-Ce3 (3) 28 D	2,20		1811,673	
VP6-Ca2 (1) 28 D	1,70	1,87	2068,878	2266,076
VP6-Ca2 (2) 28 D	1,90		2323,916	
VP6-Ca2 (3) 28 D	2,00		2405,435	
VP6-Ca3 (1) 28 D	3,80	3,00	2669,364	2712,719
VP6-Ca3 (2) 28 D	2,60		2720,205	
VP6-Ca3 (3) 28 D	2,60		2748,587	
VP6-Hi2 (1) 28 D	1,40	1,50	330,452	330,299
VP6-Hi2 (2) 28 D	1,50		336,571	
VP6-Hi2 (3) 28 D	1,60		323,875	
VP6-Hi3 (1) 28 D	1,70	1,73	353,928	346,759
VP6-Hi3 (2) 28 D	1,60		343,174	
VP6-Hi3 (3) 28 D	1,90		343,174	

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Tabla 35

Deformación unitaria máxima y esfuerzo máximo de las muestras estabilizadas con ceniza del volcán Guagua Pichincha al 3% curadas por 56 días

COMPRESIÓN SIMPLE EN SUELOS				
ASTM D2166; ASTM D854				
CENIZA DEL VOLCÁN GUAGUA PICHINCHA 3%				
MUESTRA	DEFORMACIÓN UNITARIA (mm)		ESFUERZO MÁXIMO (kN/m²)	
VP3-Ce2 (1) 56 D	1,70	1,80	232,993	261,330
VP3-Ce2 (2) 56 D	1,80		293,477	
VP3-Ce2 (3) 56 D	1,90		257,519	
VP3-Ce3 (1) 56 D	2,00	2,03	1518,103	1480,098
VP3-Ce3 (2) 56 D	1,90		1420,555	
VP3-Ce3 (3) 56 D	2,20		1501,637	
VP3-Ca2 (1) 56 D	2,00	2,13	2466,978	2424,789
VP3-Ca2 (2) 56 D	2,20		2438,309	
VP3-Ca2 (3) 56 D	2,20		2369,081	
VP3-Ca3 (1) 56 D	2,80	2,87	3900,685	3869,228
VP3-Ca3 (2) 56 D	3,00		3739,633	
VP3-Ca3 (3) 56 D	2,80		3967,367	
VP3-Hi2 (1) 56 D	1,80	1,83	317,764	333,933
VP3-Hi2 (2) 56 D	1,50		367,169	
VP3-Hi2 (3) 56 D	2,20		316,866	
VP3-Hi3 (1) 56 D	1,30	1,30	660,903	649,528
VP3-Hi3 (2) 56 D	1,50		673,142	
VP3-Hi3 (3) 56 D	1,10		614,538	

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Tabla 36

Deformación unitaria máxima y esfuerzo máximo de las muestras estabilizadas con ceniza del volcán Guagua Pichincha al 6% curadas por 56 días

COMPRESIÓN SIMPLE EN SUELOS				
ASTM D2166; ASTM D854				
CENIZA DEL VOLCÁN GUAGUA PICHINCHA 6%				
MUESTRA	DEFORMACIÓN UNITARIA (mm)		ESFUERZO MÁXIMO (kN/m²)	
VP6-Ce2 (1) 56 D	2,80	2,53	443,903	456,729
VP6-Ce2 (2) 56 D	2,60		491,892	
VP6-Ce2 (3) 56 D	2,20		434,391	
VP6-Ce3 (1) 56 D	2,20	1,93	2930,717	2886,911
VP6-Ce3 (2) 56 D	1,80		2782,977	
VP6-Ce3 (3) 56 D	1,80		2947,039	
VP6-Ca2 (1) 56 D	2,20	2,13	2835,569	2811,369
VP6-Ca2 (2) 56 D	2,20		2823,502	
VP6-Ca2 (3) 56 D	2,00		2775,036	
VP6-Ca3 (1) 56 D	2,80	2,47	3899,858	3629,755
VP6-Ca3 (2) 56 D	2,40		3691,569	
VP6-Ca3 (3) 56 D	2,20		3297,837	
VP6-Hi2 (1) 56 D	1,50	1,67	569,914	548,474
VP6-Hi2 (2) 56 D	1,70		537,754	
VP6-Hi2 (3) 56 D	1,80		537,754	
VP6-Hi3 (1) 56 D	1,60	1,43	604,970	598,209
VP6-Hi3 (2) 56 D	1,40		618,939	
VP6-Hi3 (3) 56 D	1,30		570,717	

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Tabla 37*Deformación unitaria máxima y esfuerzo máximo de las muestras patrón*

COMPRESIÓN SIMPLE EN SUELOS				
ASTM D2166; ASTM D854				
MUESTRA PATRÓN				
MUESTRA	DEFORMACIÓN UNITARIA (mm)		ESFUERZO MÁXIMO (kN/m²)	
SN-Ce2 (1)	1,40	1,37	325,881	348,423
SN-Ce2 (2)	1,20		357,126	
SN-Ce2 (3)	1,50		362,263	
SN-Ce3 (1)	1,00	1,30	357,628	360,202
SN-Ce3 (2)	1,20		389,548	
SN-Ce3 (3)	1,70		333,431	
SN-Ca2 (1)	1,50	1,47	117,154	123,522
SN-Ca2 (2)	1,30		123,926	
SN-Ca2 (3)	1,60		129,486	
SN-Ca3 (1)	2,40	1,97	344,559	338,942
SN-Ca3 (2)	1,30		350,969	
SN-Ca3 (3)	2,20		321,297	

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

3.8.3. CORTE DIRECTO

Los informes de laboratorio correspondientes a este ensayo se presentan en el Anexo 7. En las Tablas de la 38 a la 41 se presentan los resultados del ensayo de corte directo para el suelo estabilizado con las cenizas volcánicas y los activadores puzolánicos.

Tabla 38

Cohesión y ángulo de fricción de las muestras estabilizadas con ceniza del volcán Cotopaxi

CORTE DIRECTO EN SUELOS		
ASTM D3080		
CENIZA DEL VOLCÁN COTOPAXI		
MUESTRA	COHESIÓN (kg/cm ²)	ÁNGULO DE FRICCIÓN (°)
VC3-Ce2	0,30	34,99
VC3-Ce3	0,35	33,02
VC3-Ca2	1,35	40,36
VC3-Ca3	1,50	38,66
VC3-Hi2	0,28	37,23
VC3-Hi3	0,31	34,22
VC6-Ce2	0,35	33,02
VC6-Ce3	0,42	30,96
VC6-Ca2	1,50	30,11
VC6-Ca3	1,61	29,25
VC6-Hi2	0,30	33,02
VC6-Hi3	0,35	30,54

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Tabla 39

Cohesión y ángulo de fricción de las muestras estabilizadas con ceniza del volcán Tungurahua

CORTE DIRECTO EN SUELOS		
ASTM D3080		
CENIZA DEL VOLCÁN TUNGURAHUA		
MUESTRA	COHESIÓN (kg/cm ²)	ÁNGULO DE FRICCIÓN (°)
VT3-Ce2	0,49	36,87
VT3-Ce3	1,45	30,96
VT3-Ca2	1,10	41,35
VT3-Ca3	1,72	39,69
VT3-Hi2	0,50	35,37
VT3-Hi3	0,55	30,11
VT6-Ce2	0,63	34,61
VT6-Ce3	1,60	29,25
VT6-Ca2	1,21	39,69
VT6-Ca3	1,80	36,87
VT6-Hi2	0,60	30,11
VT6-Hi3	0,68	28,21

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Tabla 40

Cohesión y ángulo de fricción de las muestras estabilizadas con ceniza del volcán Guagua Pichincha

CORTE DIRECTO EN SUELOS		
ASTM D3080		
CENIZA DEL VOLCÁN GUAGUA PICHINCHA		
MUESTRA	COHESIÓN (kg/cm ²)	ÁNGULO DE FRICCIÓN (°)
VP3-Ce2	0,37	41,99
VP3-Ce3	1,10	39,69
VP3-Ca2	0,82	43,53
VP3-Ca3	1,25	42,30
VP3-Hi2	0,28	38,31
VP3-Hi3	0,30	33,02
VP6-Ce2	1,25	33,62
VP6-Ce3	1,36	32,21
VP6-Ca2	0,90	33,82
VP6-Ca3	1,60	31,80
VP6-Hi2	0,32	37,60
VP6-Hi3	0,35	32,21

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Tabla 41

Cohesión y ángulo de fricción de las muestras patrón

CORTE DIRECTO EN SUELOS		
ASTM D3080		
MUESTRA PATRÓN		
MUESTRA	COHESIÓN (kg/cm ²)	ÁNGULO DE FRICCIÓN (°)
SN-Ce2	0,45	28,81
SN-Ce3	0,50	27,47
SN-Ca2	0,50	33,02
SN-Ca3	1,80	32,62

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

3.8.4. DIFRACCIÓN DE RAYOS X

En las Figuras 72, 73, 74 y 75 se presentan los difractogramas del suelo estabilizado con cemento y cal (muestras patrón). No se realizó la estabilización entre suelo natural e hidróxido de sodio, puesto que éste es netamente un activador, por lo cual requiere de una puzolana; en este estudio, el suelo no es contemplado como tal, ya que requiere de un tratamiento de calcinación.

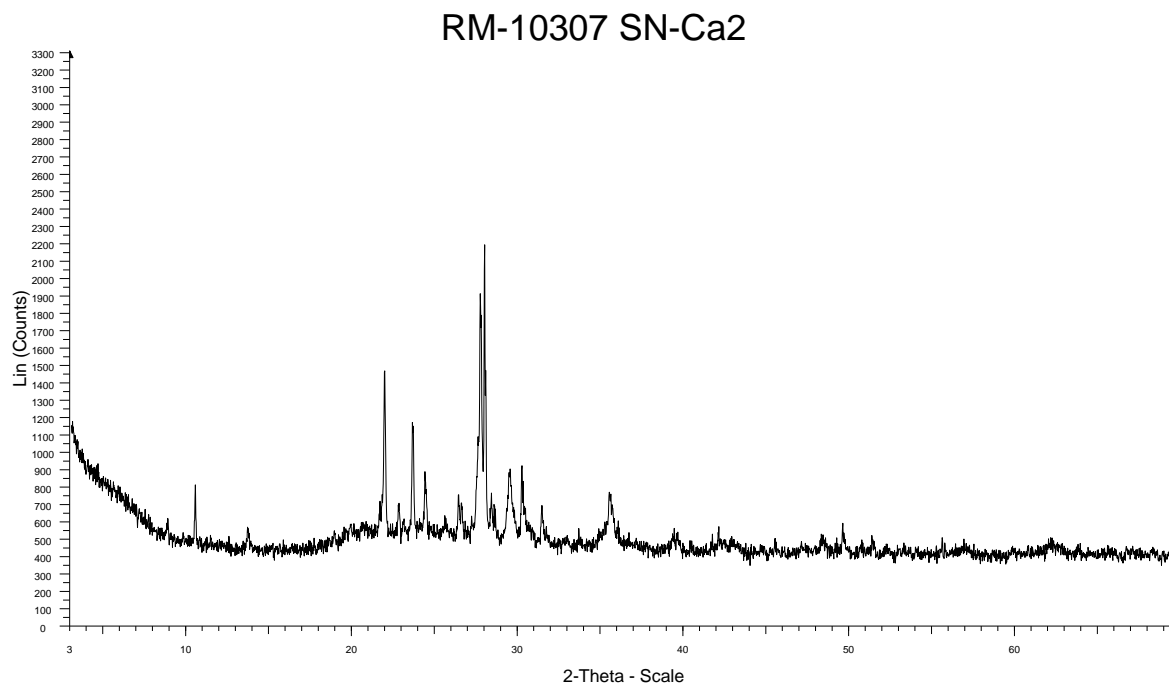


Figura 72. Difractograma de la muestra estabilizada con cal al 2%
Elaborado por: (DEMEX, 2022)

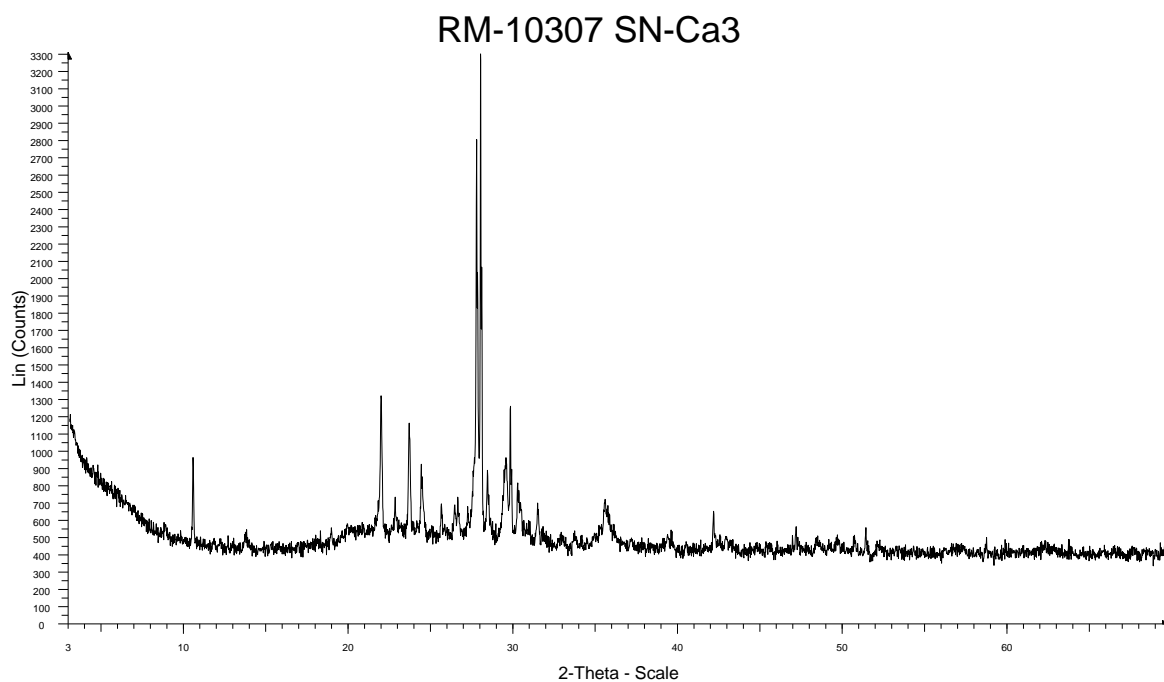


Figura 73. Difractograma de la muestra estabilizada con cal al 3%
Elaborado por: (DEMEX, 2022)

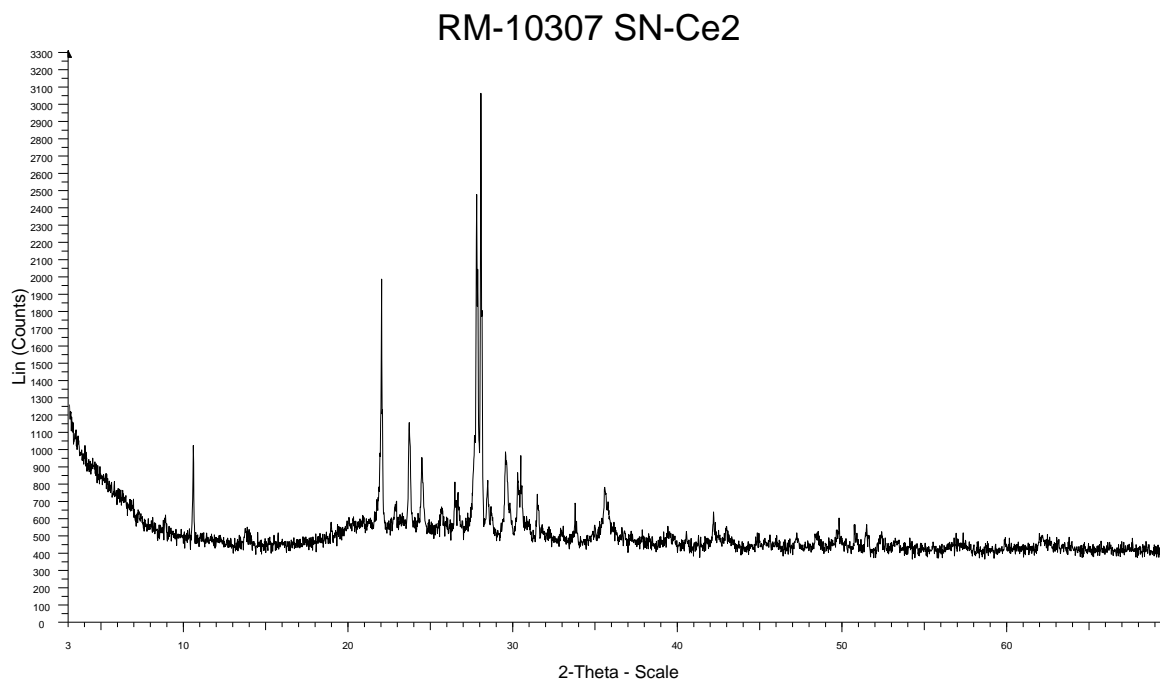


Figura 74. Difractograma de la muestra estabilizada con cemento al 2%
Elaborado por: (DEMEX, 2022)

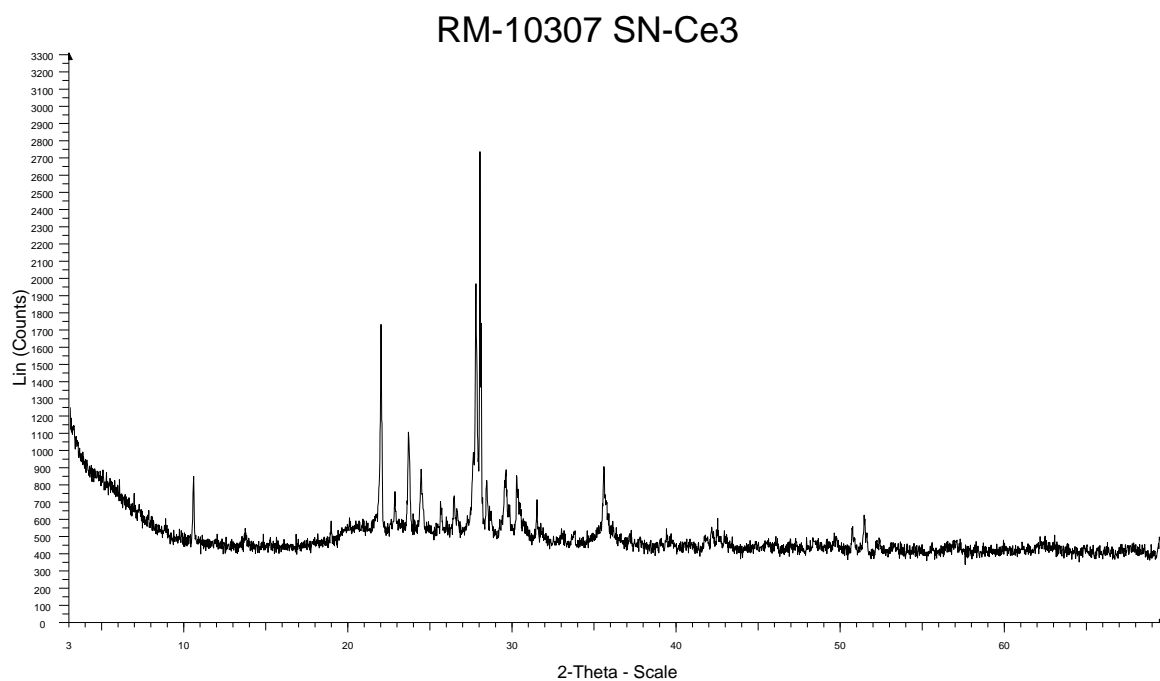


Figura 75. Difractograma de la muestra estabilizada con cemento al 3%
Elaborado por: (DEMEX, 2022)

En la Tabla 42 se presentan los resultados para el suelo estabilizado con cemento y cal.

Tabla 42

Resultados del ensayo de difracción de rayos X del suelo estabilizado con cemento y cal

MINERAL	FÓRMULA	SN-Ca2 (%)	SN-Ca3 (%)	SN-Ce2 (%)	SN-Ce3 (%)
Grupo plagiocacas	(Na,Ca)Al(Si,Al)Si ₂ O ₈	84	83	88	87
Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	7	7	6	6
Cordierita	Mg ₂ Al ₄ Si ₅ O ₁₈	3	4	3	3
Calcita	CaCO ₃	2	3	-	-
Maghemita	Fe ³⁺ ₂ O ₃	2	1	1	2
Hematita	Fe ₂ O ₃	1	1	1	1
Cuarzo	SiO ₂	1	1	1	1

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

3.8.5. TERMOGRAVIMETRÍA

En las Figuras 76, 77, 78 y 79 se presenta los termogramas resultantes para el suelo estabilizado con cemento y cal. Como se explicó previamente, no se consideró una estabilización entre el suelo natura y el hidróxido de sodio, puesto que no habría reacción entre ambos compuestos.

Muestra (código cliente): SN-Ca2

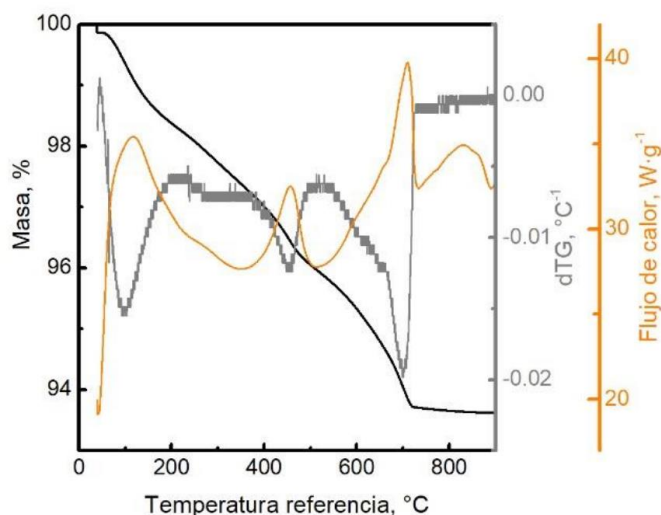


Figura 76. Termograma de la muestra estabilizada con cal al 2%
Elaborado por: (DEMEX, 2022)

Muestra (código cliente): SN-Ca3

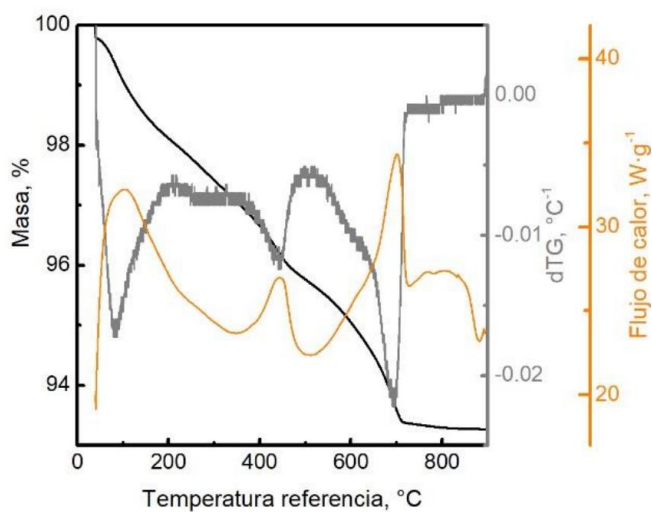


Figura 77. Termograma de la muestra estabilizada con cal al 3%
Elaborado por: (DEMEX, 2022)

Muestra (código cliente): SN-Ce2

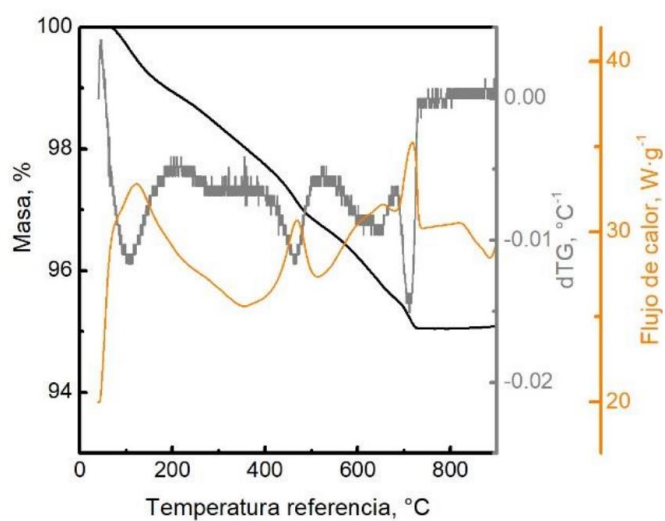


Figura 78. Termograma de la muestra estabilizada con cemento al 2%
Elaborado por: (DEMEX, 2022)

Muestra (código cliente): SN-Ce3

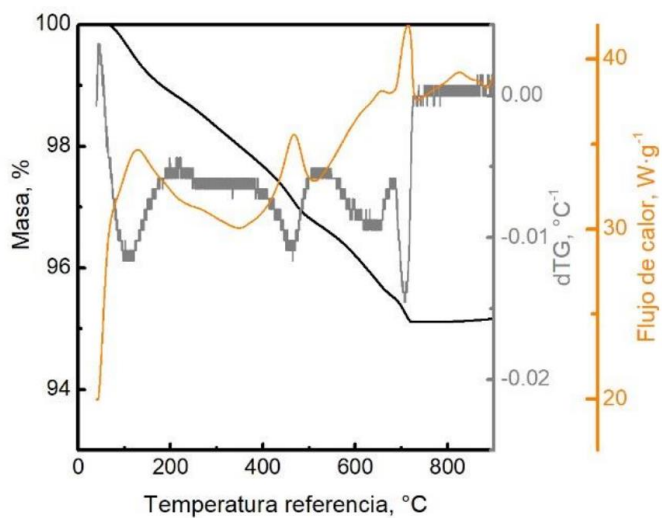


Figura 79. Termograma de la muestra estabilizada con cemento al 3%
Elaborado por: (DEMEX, 2022)

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1. RESULTADOS DE MUESTRAS NATURALES Y ESTABILIZADAS

El presente capítulo explica los resultados de los ensayos realizados a las muestras de suelo natural, de la ceniza volcánica y suelos estabilizados; usando los porcentajes de mezcla con activadores puzolánicos explicados en capítulos anteriores.

Dichos ensayos se realizaron de manera que se pueda comparar las propiedades mecánicas y mineralógicas y así definir la dosificación cuyos resultados reflejen la mejor opción al momento de estabilizar el tipo de suelo blando en estudio.

La visualización gráfica de estos resultados y sus respectivos análisis comparativos se presentan en el subcapítulo 4.2.

4.1.1. PRÓCTOR ESTÁNDAR

A continuación, se encuentran los resultados de Proctor Estándar de las estabilizaciones realizadas, clasificadas acorde con el activador puzolánico (cal, cemento e hidróxido de sodio).

En la Tabla 43 se evidencia una tendencia de incremento en la densidad seca máxima al momento de realizar la estabilización con cal, a excepción de la dosificación donde interviene el 6% de la ceniza del volcán Cotopaxi (VC) con 2% de cal, en la cual existe una disminución del 3.2% con respecto a la muestra de suelo natural. Analizando la humedad óptima requerida para llegar a la densidad mencionada, todas las muestras aumentan dicho valor.

Tabla 43*Resultados de Proctor Estándar de muestras estabilizadas con cal*

COMPACTACIÓN PROCTOR ESTÁNDAR			
ASTM D698			
CAL			
MUESTRA	DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm³)	HUMEDAD ÓPTIMA (%)	% DE MEJORA γ_d max
SN	1,498	14,39	0,0%
VC3-Ca2	1,546	18,8	3,2%
VC6-Ca2	1,450	16,7	3,2%
VT3-Ca2	1,507	18,1	0,6%
VT6-Ca2	1,528	18,1	2,0%
VP3-Ca2	1,526	18,4	1,9%
VP6-Ca2	1,536	18,9	2,5%
VC3-Ca3	1,530	15,7	2,1%
VC6-Ca3	1,530	17,2	2,1%
VT3-Ca3	1,566	16,4	4,5%
VT6-Ca3	1,538	18,2	2,7%
VP3-Ca3	1,505	17,7	0,5%
VP6-Ca2	1,536	18,9	2,5%

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

En la Tabla 44 se evidencia un aumento en el valor de la densidad máxima con el cemento como activador puzolánico, dándose la mayor y menor variación en la dosificación con ceniza volcánica del Tungurahua (VT), correspondientes a 3% y 6% en peso de suelo, respectivamente, en los dos casos con el 2% de adición de cemento.

Tabla 44*Resultados de Proctor Estándar de muestras estabilizadas con cemento*

COMPACTACIÓN PROCTOR ESTÁNDAR			
ASTM D698			
CEMENTO			
MUESTRA	DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm³)	HUMEDAD ÓPTIMA (%)	% DE MEJORA γ_d max
SN	1,498	14,39	0,0%
VC3-Ce2	1,540	13,4	2,8%
VC6-Ce2	1,546	14,0	3,2%
VT3-Ce2	1,568	17,5	4,7%
VT6-Ce2	1,511	16,6	0,9%
VP3-Ce2	1,554	17,9	3,7%
VP6-Ce2	1,550	17,3	3,5%
VC3-Ce3	1,532	15,3	2,3%
VC6-Ce3	1,534	14,7	2,4%
VT3-Ce3	1,526	18,4	1,9%
VT6-Ce3	1,552	16,6	3,6%
VP3-Ce3	1,566	16,7	4,5%
VP6-Ce3	1,564	16,7	4,4%

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

En el caso de las muestras estabilizadas con hidróxido de sodio detalladas en la Tabla 45, se da mayor incremento de la densidad seca máxima en comparación con la cal y el cemento; siendo la dosificación con 3% de ceniza volcánica del Cotopaxi junto al 2% de activador mencionado, la que presenta el mayor aumento de dicha propiedad del suelo.

Tabla 45

Resultados de Proctor Estándar de muestras estabilizadas con hidróxido de sodio

COMPACTACIÓN PROCTOR ESTÁNDAR			
ASTM D698			
HIDRÓXIDO DE SODIO			
MUESTRA	DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm³)	HUMEDAD ÓPTIMA (%)	% DE MEJORA γ_d max
SN	1,498	14,39	0,0%
VC3-Hi2	1,617	13,9	7,9%
VC6-Hi2	1,593	14,3	6,3%
VT3-Hi2	1,591	17,9	6,2%
VT6-Hi2	1,579	16,3	5,4%
VP3-Hi2	1,558	16,3	4,0%
VP6-Hi2	1,556	16,5	3,9%
VC3-Hi3	1,517	18,5	1,3%
VC6-Hi3	1,572	14,1	4,9%
VT3-Hi3	1,589	16,2	6,1%
VT6-Hi3	1,585	16,8	5,8%
VP3-Hi3	1,574	16,2	5,1%
VP6-Hi3	1,519	17,5	1,4%

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

4.1.2. RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE

A continuación, se encuentran los resultados de los ensayos de compresión simple de las estabilizaciones realizadas, clasificadas acorde con el activador puzolánico (cal, cemento e hidróxido de sodio).

En la Tabla 46 se evidencia una tendencia de incremento en el esfuerzo último al momento de realizar la estabilización con cal, siendo éste en al menos 673% en comparación con su respectiva muestra patrón. Cabe mencionar que existe un menor aumento cuando se usa un mayor porcentaje de cal (3%), pero manteniéndose siempre la proporcionalidad directa entre el tiempo de curado y el valor del esfuerzo.

Tabla 46*Resultados de compresión simple en suelos de muestras estabilizadas con cal*

COMPRESIÓN SIMPLE EN SUELOS						
ASTM D2166; ASTM D854						
CAL						
MUESTRA	ESFUERZO MÁXIMO (kN/m ²)		% DE MEJORA DEL ESF. MÁX. RESPECTO A MUESTRA PATRÓN		% DE MEJORA DEL ESF. MÁX. RESPECTO A SUELO NATURAL	
	28 D	56 D	28 D	56 D	28 D	56 D
SN	35,14		-		-	
SN-Ca2	123,52		-		-	
VC3-Ca2	3091,56	3837,46	2402,8%	3006,7%	8697,8%	10820,5%
VC6-Ca2	2591,13	3023,80	1997,7%	2348,0%	7273,7%	8505,0%
VT3-Ca2	2063,55	2424,79	1570,6%	1863,0%	5772,4%	6800,4%
VT6-Ca2	2110,49	2815,34	1608,6%	2179,2%	5906,0%	7911,8%
VP3-Ca2	2245,52	2759,26	1717,9%	2133,8%	6290,2%	7752,2%
VP6-Ca2	2266,08	2811,37	1734,6%	2176,0%	6348,7%	7900,5%
SN-Ca3	338,94		-		-	
VC3-Ca3	3558,87	4413,34	950,0%	1202,1%	10027,7%	12459,3%
VC6-Ca3	2763,94	4459,04	715,5%	1215,6%	7765,5%	12589,4%
VT3-Ca3	2851,71	3869,23	741,4%	1041,6%	8015,3%	10910,9%
VT6-Ca3	2621,41	3183,59	673,4%	839,3%	7359,9%	8959,7%
VP3-Ca3	3274,79	3991,37	866,2%	1077,6%	9219,3%	11258,5%
VP6-Ca3	2712,72	3619,75	700,3%	968,0%	7619,7%	10201,0%

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

En la Tabla 47 se evidencia que la estabilización con 2% de cemento, no presentó un aumento significativo del esfuerzo último, a comparación del mismo activador con 3%; dándose incluso un decrecimiento del esfuerzo con la adición del volcán Tungurahua en ambas dosificaciones con respecto a la muestra patrón.

Además, se mantiene la proporcionalidad directa del esfuerzo máximo con el tiempo de curado, y con el porcentaje de activador puzolánico.

Tabla 47

Resultados de compresión simple en suelos de muestras estabilizadas con cemento

COMPRESIÓN SIMPLE EN SUELOS						
ASTM D2166; ASTM D854						
CEMENTO						
MUESTRA	ESFUERZO MÁXIMO (kN/m ²)		% DE MEJORA DEL ESF. MÁX. RESPECTO A MUESTRA PATRÓN		% DE MEJORA DEL ESF. MÁX. RESPECTO A SUELO NATURAL	
	28 D	56 D	28 D	56 D	28 D	56 D
SN	35,14		-		-	
SN-Ce2	348,42		-		-	
VC3-Ce2	351,79	488,78	1,0%	40,3%	901,1%	1290,9%
VC6-Ce2	442,07	537,24	26,9%	54,2%	1158,0%	1428,9%
VT3-Ce2	143,82	261,33	-58,7%	-25,0%	309,3%	643,7%
VT6-Ce2	310,53	370,68	-10,9%	6,4%	783,7%	954,9%
VP3-Ce2	430,40	550,50	23,5%	58,0%	1124,8%	1466,6%
VP6-Ce2	391,38	456,73	12,3%	31,1%	1013,8%	1199,7%
SN-Ce3	360,20		-		-	
VC3-Ce3	1124,73	1542,92	212,2%	328,3%	3100,7%	4290,8%
VC6-Ce3	1523,36	1958,51	322,9%	443,7%	4235,1%	5473,5%
VT3-Ce3	1111,74	1480,10	208,6%	310,9%	3063,8%	4112,0%
VT6-Ce3	1243,56	1516,45	245,2%	321,0%	3438,9%	4215,4%
VP3-Ce3	2281,23	2649,51	533,3%	635,6%	6391,8%	7439,9%
VP6-Ce3	1938,28	2886,91	438,1%	701,5%	5415,9%	8115,5%

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

En la Tabla 48 se evidencia una tendencia de incremento en el esfuerzo último al momento de realizar la estabilización con hidróxido de sodio, en relación con la muestra de suelo natural; pero a diferencia de los valores obtenidos de las estabilizaciones de ceniza volcánica con cal y cemento, éste presenta los esfuerzos últimos más bajos y variaciones mínimas entre los tiempos de curado.

Tabla 48

Resultados de compresión simple en suelos de muestras estabilizadas con hidróxido de sodio

COMPRESIÓN SIMPLE EN SUELOS				
ASTM D2166; ASTM D854				
HIDRÓXIDO DE SODIO				
MUESTRA	ESFUERZO MÁXIMO (kN/m ²)		% DE MEJORA DEL ESF. MÁX. RESPECTO A SUELO NATURAL	
	28 D	56 D	28 D	56 D
SN	35,14		-	
VC3-Hi2	426,95	534,47	1115,0%	1421,0%
VC6-Hi2	449,39	505,00	1178,9%	1337,1%
VT3-Hi2	236,47	333,93	572,9%	850,3%
VT6-Hi2	338,93	486,18	864,5%	1283,6%
VP3-Hi2	477,56	535,67	1259,0%	1424,4%
VP6-Hi2	330,30	548,47	840,0%	1460,8%
VC3-Hi3	535,73	639,48	1424,6%	1719,8%
VC6-Hi3	621,54	695,96	1668,7%	1880,5%
VT3-Hi3	502,98	649,53	1331,4%	1748,4%
VT6-Hi3	403,69	515,21	1048,8%	1366,2%
VP3-Hi3	512,15	575,96	1357,5%	1539,0%
VP6-Hi3	346,76	598,21	886,8%	1602,4%

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

4.1.3. CORTE DIRECTO

A continuación, se encuentran los resultados de los ensayos de corte directo de las estabilizaciones realizadas, clasificadas acorde con el activador puzolánico (cal, cemento e hidróxido de sodio).

En la Tabla 49 se evidencia una tendencia de incremento en el ángulo de fricción al momento de realizar la estabilización con cemento, siendo mayor en todas las dosificaciones con una adición del 2% del activador, lo que se traduce a un aumento de resistencia a corte lo cual es un parámetro de importancia para determinar el mejoramiento de la estabilización de un suelo. Por otro lado, la cohesión de las muestras con 3% de cemento presentan los valores superiores.

De igual manera se observa que el porcentaje de puzolana añadido influye en el ángulo de fricción, siendo este mayor cuando la adición de ceniza volcánica disminuye.

Tabla 49*Resultados de corte directo en suelos de muestras estabilizadas con cemento*

CORTE DIRECTO EN SUELOS						
ASTM D3080						
CEMENTO						
MUESTRA	COHESIÓN (kg/cm ²)	ÁNGULO DE FRICCIÓN (°)	% DE MEJORA RESPECTO A MUESTRA PATRÓN		% DE MEJORA RESPECTO A SUELO NATURAL	
			COHESIÓN	ÁNGULO DE FRICCIÓN	COHESIÓN	ÁNGULO DE FRICCIÓN
SN	0,26	26,57	-	-	-	-
SN-Ce2	0,45	28,81	-	-	-	-
VC3-Ce2	0,30	34,99	-33,3%	21,5%	15,4%	31,7%
VC6-Ce2	0,35	33,02	-22,2%	14,6%	34,6%	24,3%
VT3-Ce2	0,49	36,87	8,9%	28,0%	88,5%	38,8%
VT6-Ce2	0,63	34,61	40,0%	20,1%	142,3%	30,3%
VP3-Ce2	0,37	41,99	-17,8%	45,7%	42,3%	58,0%
VP6-Ce2	1,25	33,62	177,8%	16,7%	380,8%	26,5%
SN-Ce3	0,50	27,47	-	-	-	-
VC3-Ce3	0,35	33,02	-30,0%	20,2%	34,6%	24,3%
VC6-Ce3	0,42	30,96	-16,0%	12,7%	61,5%	16,5%
VT3-Ce3	1,45	30,96	190,0%	12,7%	457,7%	16,5%
VT6-Ce3	1,60	29,25	220,0%	6,5%	515,4%	10,1%
VP3-Ce3	1,10	39,69	120,0%	44,5%	323,1%	49,4%
VP6-Ce3	1,36	32,21	172,0%	17,3%	423,1%	21,2%

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

En la Tabla 50, en relación con la muestra patrón, se evidencia una tendencia de incremento en el ángulo de fricción al momento de realizar la estabilización con cal, a excepción de las dos dosificaciones donde interviene la ceniza del volcán Cotopaxi con 6% de adición y la muestra VP6-Ca3, aunque ésta última disminución es mínima. Adicionalmente, se evidencia una proporcionalidad inversa con el porcentaje de puzolana y con la cantidad de activador añadidos, siendo menor el ángulo de fricción cuando se mezcla con una mayor cantidad de ceniza y cal.

Por otra parte, la cohesión presenta un aumento significativo únicamente con la adición del 2% de cal, en comparación con sus respectivas muestras patrón; sin embargo, realizando un análisis entre los valores de cohesión de las muestras estabilizadas, los más altos son las que tienen un mayor porcentaje de activador.

Tabla 50*Resultados de corte directo en suelos de muestras estabilizadas con cal*

CORTE DIRECTO EN SUELOS						
ASTM D3080						
CAL						
MUESTRA	COHESIÓN (kg/cm ²)	ÁNGULO DE FRICCIÓN (°)	% DE MEJORA RESPECTO A MUESTRA PATRÓN		% DE MEJORA RESPECTO A SUELO NATURAL	
			COHESIÓN	ÁNGULO DE FRICCIÓN	COHESIÓN	ÁNGULO DE FRICCIÓN
SN	0,26	26,57	-	-	-	-
SN-Ca2	0,50	33,02	-	-	-	-
VC3-Ca2	1,35	40,36	170,0%	22,2%	419,2%	51,9%
VC6-Ca2	1,50	30,11	200,0%	-8,8%	476,9%	13,3%
VT3-Ca2	1,10	41,35	120,0%	25,2%	323,1%	55,6%
VT6-Ca2	1,21	39,69	142,0%	20,2%	365,4%	49,4%
VP3-Ca2	0,82	43,53	64,0%	31,8%	215,4%	63,8%
VP6-Ca2	0,90	33,82	80,0%	2,4%	246,2%	27,3%
SN-Ca3	1,80	32,62	-	-	-	-
VC3-Ca3	1,50	38,66	-16,7%	18,5%	476,9%	45,5%
VC6-Ca3	1,61	29,25	-10,6%	-10,3%	519,2%	10,1%
VT3-Ca3	1,72	39,69	-4,4%	21,7%	561,5%	49,4%
VT6-Ca3	1,80	36,87	0,0%	13,0%	592,3%	38,8%
VP3-Ca3	1,25	42,30	-30,6%	29,7%	380,8%	59,2%
VP6-Ca3	1,60	31,80	-11,1%	-2,5%	515,4%	19,7%

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

En la Tabla 51 se evidencia una tendencia de incremento en el ángulo de fricción y la cohesión al momento de realizar la estabilización con hidróxido de sodio. Las estabilizaciones compuestas por la ceniza volcánica del Tungurahua evidencian los valores más altos de cohesión y los más bajos de ángulos de fricción, entre todas las dosificaciones.

Además, se analiza una proporcionalidad directa entre la cohesión y la cantidad de ceniza volcánica e hidróxido de sodio, mientras que la proporcionalidad se da de manera inversa para el ángulo de fricción.

Tabla 51

Resultados de corte directo en suelos de muestras estabilizadas con hidróxido de sodio

CORTE DIRECTO EN SUELOS				
ASTM D3080				
HIDRÓXIDO DE SODIO				
MUESTRA	COHESIÓN (kg/cm ²)	ÁNGULO DE FRICCIÓN (°)	% DE MEJORA RESPECTO A SUELO NATURAL	
			COHESIÓN	ÁNGULO DE FRICCIÓN
SN	0,26	26,57	0,0%	0,0%
VC3-Hi2	0,28	37,23	7,7%	40,1%
VC6-Hi2	0,30	33,02	15,4%	24,3%
VT3-Hi2	0,50	35,37	92,3%	33,1%
VT6-Hi2	0,60	30,11	130,8%	13,3%
VP3-Hi2	0,28	38,31	7,7%	44,2%
VP6-Hi2	0,32	37,60	23,1%	41,5%
VC3-Hi3	0,31	34,22	19,2%	28,8%
VC6-Hi3	0,35	30,54	34,6%	14,9%
VT3-Hi3	0,55	30,11	111,5%	13,3%
VT6-Hi3	0,68	28,21	161,5%	6,2%
VP3-Hi3	0,30	33,02	15,4%	24,3%
VP6-Hi3	0,35	32,21	34,6%	21,2%

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

4.1.4. TERMOGRAVIMETRÍA

Los resultados termogravimétricos de las cenizas volcánicas se presentan en la Tabla 52, donde se evidencia que la pérdida de masa total de cada puzolana es baja.

Tabla 52

Resultados de termogravimetría para las cenizas volcánicas

MUESTRA	Pérdida de peso
	(%)
VT	0,152
VC	2,481
VP	1,828

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

En los termogramas resultantes de las muestras patrón existen tres intervalos a considerar; el primero se encuentra en un rango aproximado de temperatura de 100°C a 180°C, donde se genera la deshidratación de los silicatos de calcio hidratados (CSH); el segundo intervalo, entre 400°C y 550°C, se da la descomposición de la portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$); mientras que la última zona de interés está entre los 650°C y 900°C, presentándose la descomposición de la calcita (CaCO_3).

Con las Figuras 76, 77, 78 y 79, presentadas previamente y, a partir de la derivada de la curva de termogravimetría (DTG) se puede definir de mejor manera estos rangos, para obtener un porcentaje de pérdida aproximado de dichos compuestos. En la Tabla 53 se presentan los resultados de los porcentajes para los CSH, portlandita y calcita.

Tabla 53

Resultados de termogravimetría para las muestras patrón

MUESTRA	CSH	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	CaCO_3	% total de pérdida de masa
	(% de pérdida de masa)	(% de pérdida de masa)	(% de pérdida de masa)	
SN-Ca2	0,9	1,2	1,0	6,4
SN-Ca3	1,1	1,4	1,8	6,7
SN-Ce2	0,7	1,1	1,1	4,9
SN-Ce3	0,8	1,1	1,0	4,8

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

4.1.5. DIFRACCIÓN POR RAYOS X

En Tabla 54 se presenta la relación puzolánica de las cenizas volcánicas ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$), se observa que ésta se encuentra en un rango de 2.95 a 3.44. De acuerdo con Lemougna et al. (2014) el valor óptimo para que una ceniza sea considerada como puzolana reactiva se encuentra entre 3.3 a 4.5.

De igual manera, todas las cenizas presentan un alto porcentaje de ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$), mayor a 60%. Tchakoute et al. (2013) evidencia que la cantidad de aluminosilicatos en una puzolana influye positivamente al momento de ser usada como materia prima en la síntesis de geopolímeros.

Tabla 54*Resultados del ensayo de Difracción de Rayos X para las cenizas volcánicas*

MUESTRA	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	SiO ₂ + Al ₂ O ₃
	(%)	(%)	Relación puzolánica	Aluminosilicatos
VC	62	18	3,44	80
VP	59	20	2,95	79
VT	73	14	5,21	87

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

En la Tabla 55, se puede evidenciar los minerales que presenta el suelo estabilizado con cal y cemento, con un contenido de plagioclasas considerablemente alto en relación del resto de minerales identificados, cabe mencionar que en las muestras patrón con cemento, es mayor este porcentaje. También se observa que las muestras dosificadas con cal presentan calcita, mientras que aquellas estabilizadas con cemento, este mineral no está presente.

Tabla 55*Resultados del ensayo de Difracción de Rayos X para las muestras patrón*

MINERAL	FÓRMULA	SN-Ca2 (%)	SN-Ca3 (%)	SN-Ce2 (%)	SN-Ce3 (%)
Grupo plagioclasas	(Na,Ca)Al(Si,Al)Si ₂ O ₈	84	83	88	87
Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	7	7	6	6
Cordierita	Mg ₂ Al ₄ Si ₅ O ₁₈	3	4	3	3
Calcita	CaCO ₃	2	3	-	-
Maghemita	Fe ³⁺ ₂ O ₃	2	1	1	2
Hematita	Fe ₂ O ₃	1	1	1	1
Cuarzo	SiO ₂	1	1	1	1

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

4.2. ANÁLISIS COMPARATIVO DE MUESTRAS NATURALES Y ESTABILIZADAS PARA DIFERENTES CENIZAS VOLCÁNICAS DE REEMPLAZO

4.2.1. PRÓCTOR ESTÁNDAR

En la Figura 80 se observa el aumento de la densidad seca máxima en todas las estabilizaciones del suelo con la adición de 2% y 3% de cemento en comparación del suelo natural; dado que la compactación se encuentra relacionada con el tipo de suelo, al adicionar cierta cantidad de finos (cemento y ceniza volcánica) en la

muestra natural se modifica su estructura, donde éstos llenan los vacíos que tenga el suelo al momento de compactar, generando que se alcance una densidad seca mayor y, a su vez sea necesaria una mayor cantidad de agua, para facilitar la reacomodación de las partículas del suelo. En la Figura 81 se evidencia el incremento de la humedad óptima descrito previamente.

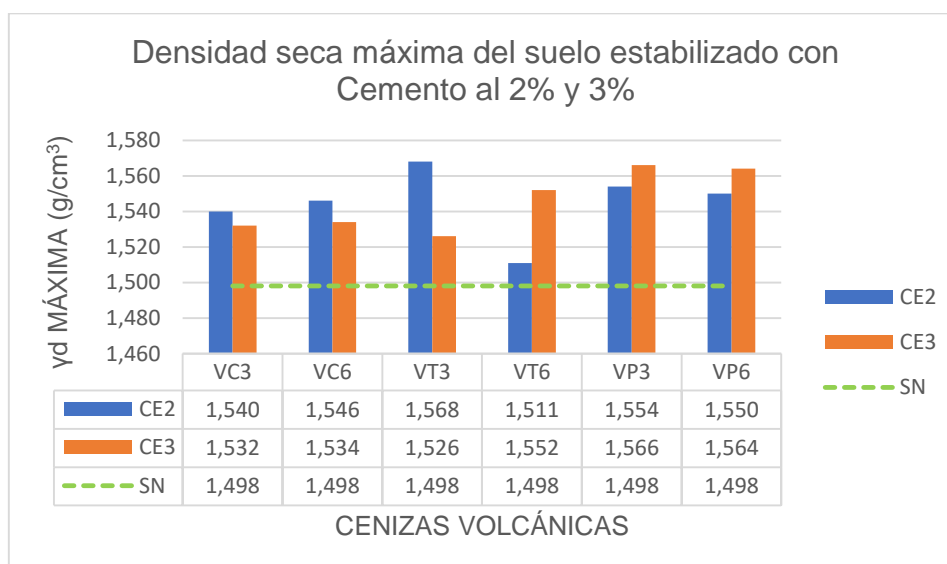


Figura 80. Comparación de la densidad seca máxima del suelo estabilizado con cemento al 2% y 3%

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

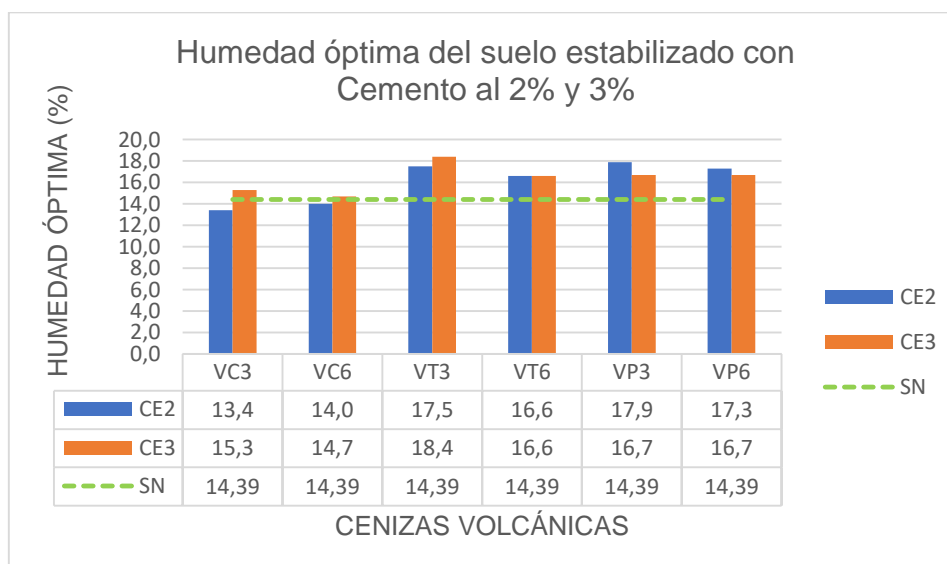


Figura 81. Comparación de la humedad óptima del suelo estabilizado con cemento al 2% y 3%

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Analizando el porcentaje de aumento de los resultados de densidad seca máxima con respecto al suelo natural, el cual se observa en la Figura 82, se tiene un incremento considerable en la dosificación con 3% de ceniza del volcán Tungurahua y 2% de cemento; mientras que la menor variación se da cuando se estabiliza con 6% de esta puzolana y el mismo porcentaje de activador.

En el caso de las cenizas del volcán Cotopaxi y Guagua Pichincha, se tienen las mayores variaciones de densidad seca máxima en las mezclas con 6% de puzolana y 2% de cemento (VC6-Ce2), y el 3% de ceniza y 3% de activador (VP3-Ce3), respectivamente.

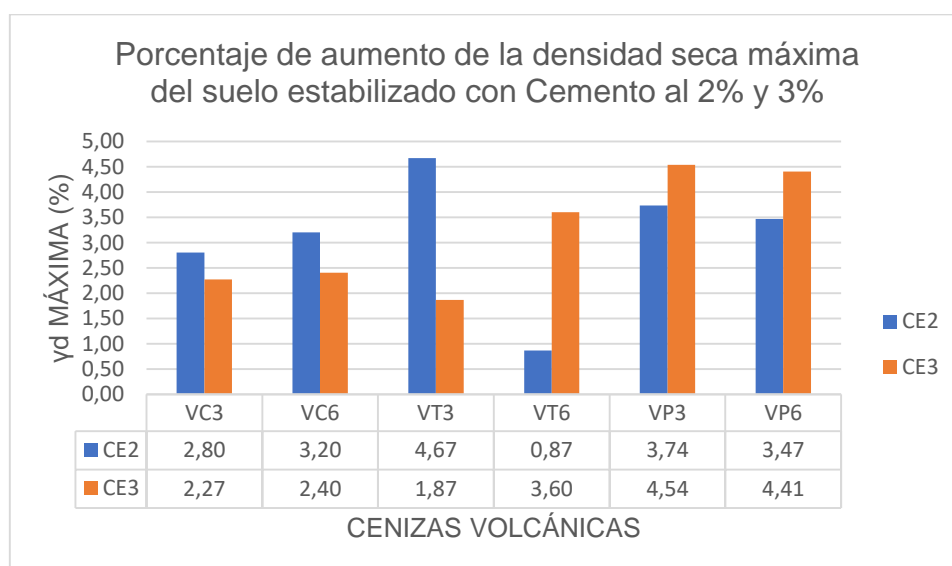


Figura 82. Porcentaje de aumento de la densidad seca máxima del suelo estabilizado con cemento al 2% y 3%
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

En la Figura 83 se observa el aumento de la densidad seca máxima en las estabilizaciones del suelo con la adición de cal en comparación del suelo natural, exceptuando la muestra VC6-Ca2, donde se tiene un descenso del γ_d , a esta estabilización se la considera como un valor atípico por ser la única con este comportamiento distinto. Por otro lado, en la Figura 84 se evidencia que al añadir este activador incrementa la humedad óptima en todas las dosificaciones, la mayoría estando en un rango entre el 18% y 19%.

Estos incrementos observados pueden deberse a que, tanto la cal como las cenizas volcánicas son consideradas material fino debido al tamaño de sus

partículas, y al ser incorporadas al suelo llenan los espacios vacíos, aumentando tanto la densidad seca máxima como la humedad óptima en el nuevo suelo estabilizado.

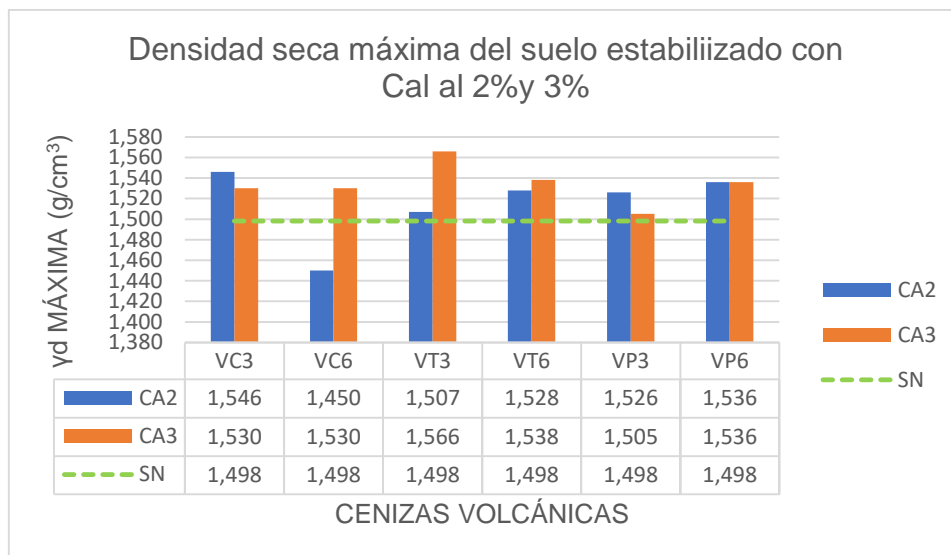


Figura 83. Comparación de la densidad seca máxima del suelo estabilizado con cal al 2% y 3%

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

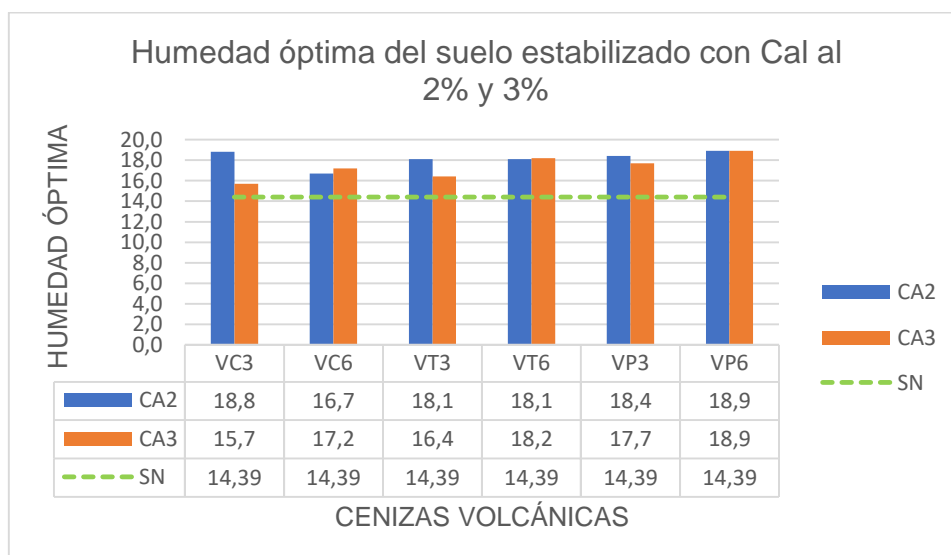


Figura 84. Comparación de la humedad óptima del suelo estabilizado con cal al 2% y 3%

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Analizando el porcentaje de variación de los resultados de densidad seca máxima con respecto al suelo natural, el cual se observa en la Figura 85, la muestra con 3% de ceniza del volcán Tungurahua y 3% de cal presenta el mayor porcentaje

de incremento; mientras que la dosificación con menor variación es la mezcla del suelo con 3% de ceniza volcánica del Guagua Pichincha y 3% de activador.

En el caso de las estabilizaciones con cenizas del volcán Cotopaxi y Guagua Pichincha, se tienen las mayores variaciones de densidad seca máxima en las mezclas con 3% de puzolana y 2% de cal (VC3-Ca2), y el 6% de ceniza con 2% o 3% de activador (VP6-Ca3 o VP6-Ca2), respectivamente.

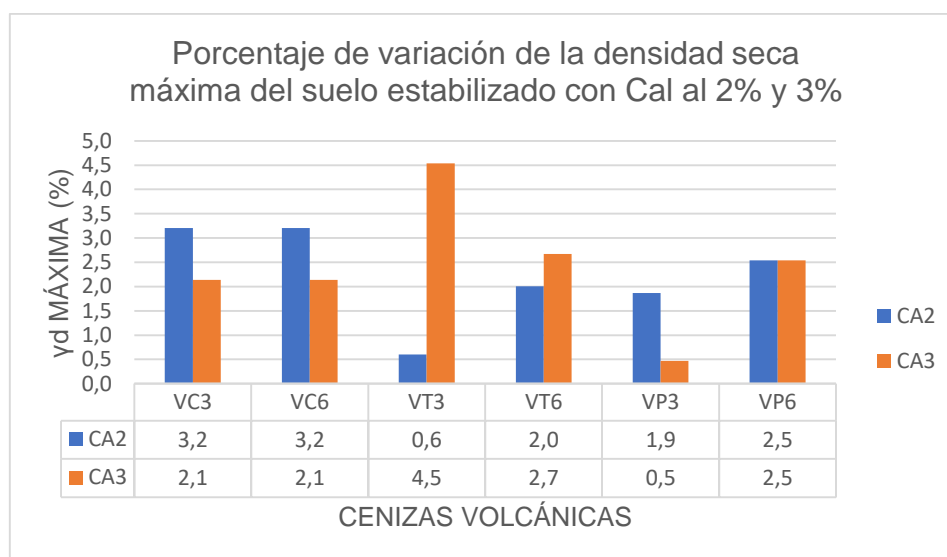


Figura 85. Porcentaje de variación de la densidad seca máxima del suelo estabilizado con cal al 2% y 3%

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

En la Figura 86 se observa el aumento de la densidad seca máxima en todas las estabilizaciones del suelo, con la adición de hidróxido de sodio en comparación del suelo natural. Por otro lado, en la Figura 87 se evidencia que al añadir este activador incrementa la humedad óptima en la mayoría de las dosificaciones, a excepción de las mezclas en las que interviene el 6% de ceniza volcánica del Cotopaxi con ambas cantidades de hidróxido de sodio, y el 3% de la misma puzolana con 2% de activador, donde las variaciones son mínimas, por lo cual no se las considera significativas en el análisis.

Los incrementos de densidad seca máxima y humedad óptima presentados al estabilizar el suelo con hidróxido de sodio, pueden darse debido a la adición de las cenizas volcánicas, reestructurando al suelo de manera que presenta mayor cantidad de material fino capaz de llenar los vacíos del suelo, y consecuentemente requiriendo mayor cantidad de agua para el reacomodo de las partículas.

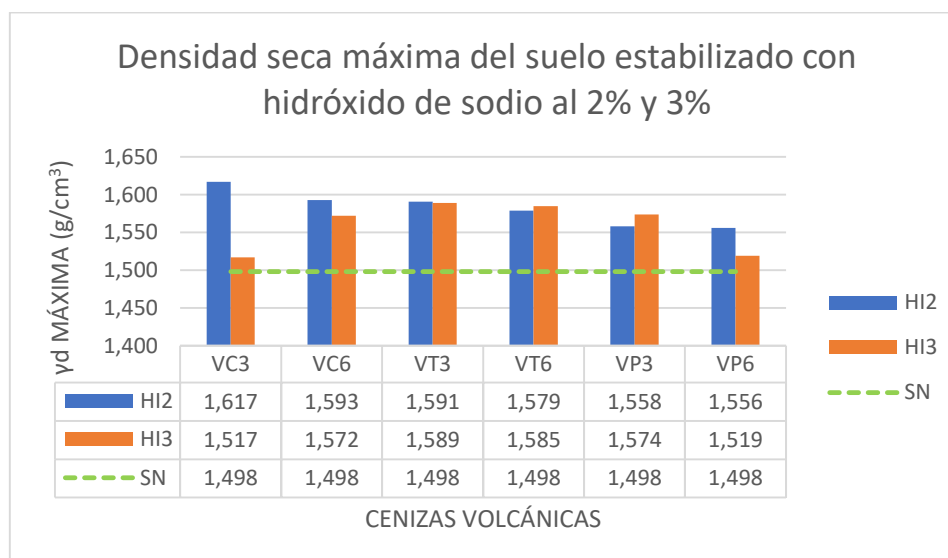


Figura 86. Comparación de la densidad seca máxima del suelo estabilizado con hidróxido de sodio al 2% y 3%
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

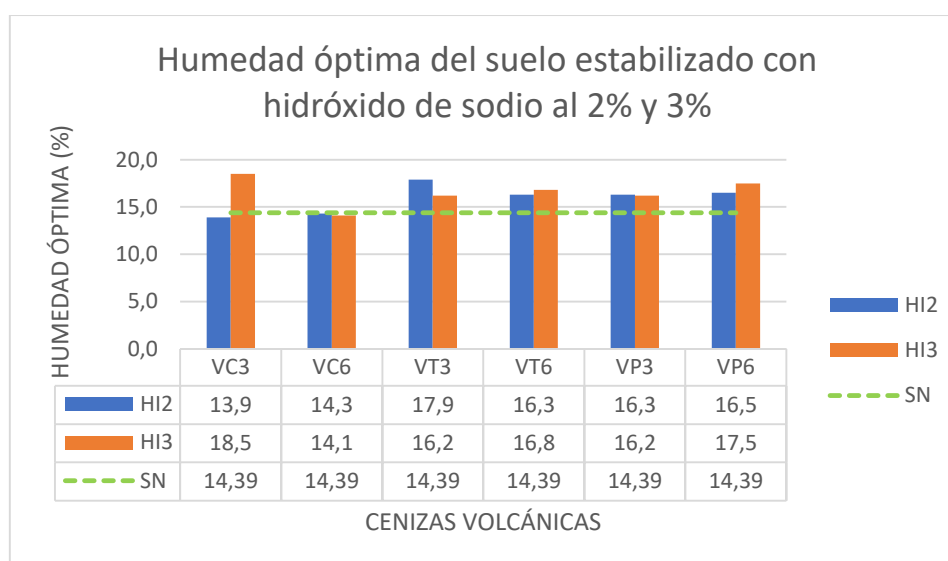


Figura 87. Comparación de la humedad óptima del suelo estabilizado con hidróxido de sodio al 2% y 3%
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Analizando el porcentaje de variación de los resultados de densidad seca máxima con respecto al suelo natural, el cual se observa en la Figura 88, se presentan los valores de mayor y menor incremento en las dosificaciones con 3% de ceniza del volcán Cotopaxi, cuando ésta se activa con el 2% y 3% de hidróxido de sodio, respectivamente.

Para ambas estabilizaciones, con cenizas volcánicas del Tungurahua y Guagua Pichincha, se tienen las mayores variaciones de densidad seca máxima en las mezclas con 3% de puzolana y 2% de hidróxido de sodio.

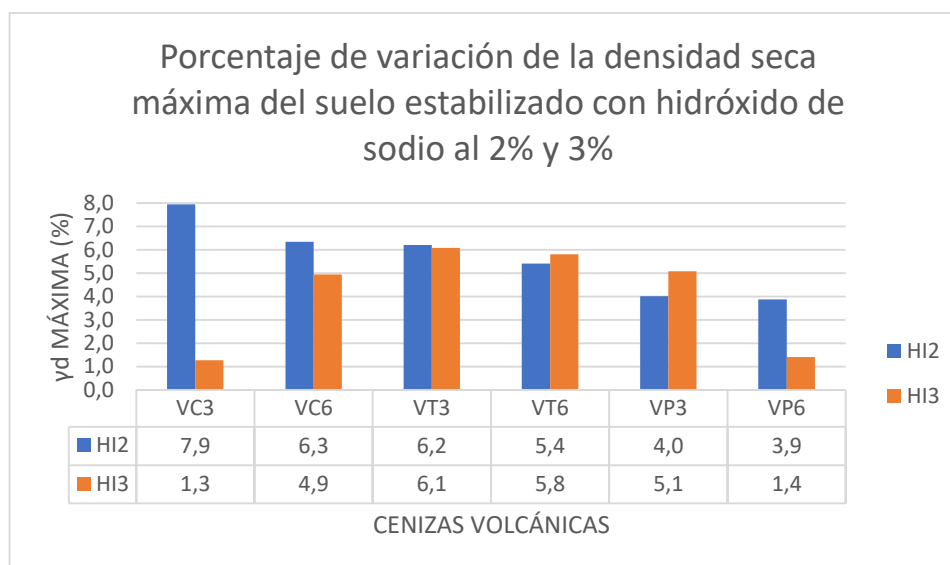


Figura 88. Porcentaje de aumento de la densidad seca máxima del suelo estabilizado con hidróxido de sodio al 2% y 3%
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Finalmente, se observa que, en la mayoría de los casos, la adición de puzolana junto con un activador incrementa los valores de la densidad seca máxima y la humedad óptima, debido a la alteración de la parte fina del suelo. La estabilización del suelo con ceniza del volcán Tungurahua junto con cemento, cal o hidróxido de sodio, presenta un aumento en la densidad seca de más del 4.5% cuando se adiciona el 3% de la puzolana en peso de suelo en humedad óptima.

Al comparar entre los activadores, se presenta un mayor incremento al valor de la densidad seca cuando se estabiliza con hidróxido de sodio, siendo éste entre 5% y 8% con respecto al suelo natural.

4.2.2. RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE

En la Figura 89, en las dosificaciones con el 2% de activador no se aprecia un cambio significativo con respecto a la muestra patrón, mientras que las dosificaciones con el 3% de adición de cemento tienen un incremento relevante en ambas cantidades de puzolana; ésto puede darse ya que la ceniza volcánica requiere de una mínima cantidad de cemento para obtener resultados favorables

en cuanto a la activación y resistencia a la compresión simple, donde es evidente que el 2% de cemento no es el idóneo, mientras que, se puede considerar al 3% de cemento como una cantidad conveniente para su uso en conjunto con las cenizas volcánicas, destacándose las estabilizaciones en las que intervienen las cenizas del volcán Guagua Pichincha.

De igual manera, se aprecia que ambas muestras patrón tienen resistencia a compresión simple muy cercanas, y cuando es mezclada con ceniza volcánica este valor incrementa o disminuye, comprobando que existe una reacción interna entre ambos componentes, independientemente del suelo.

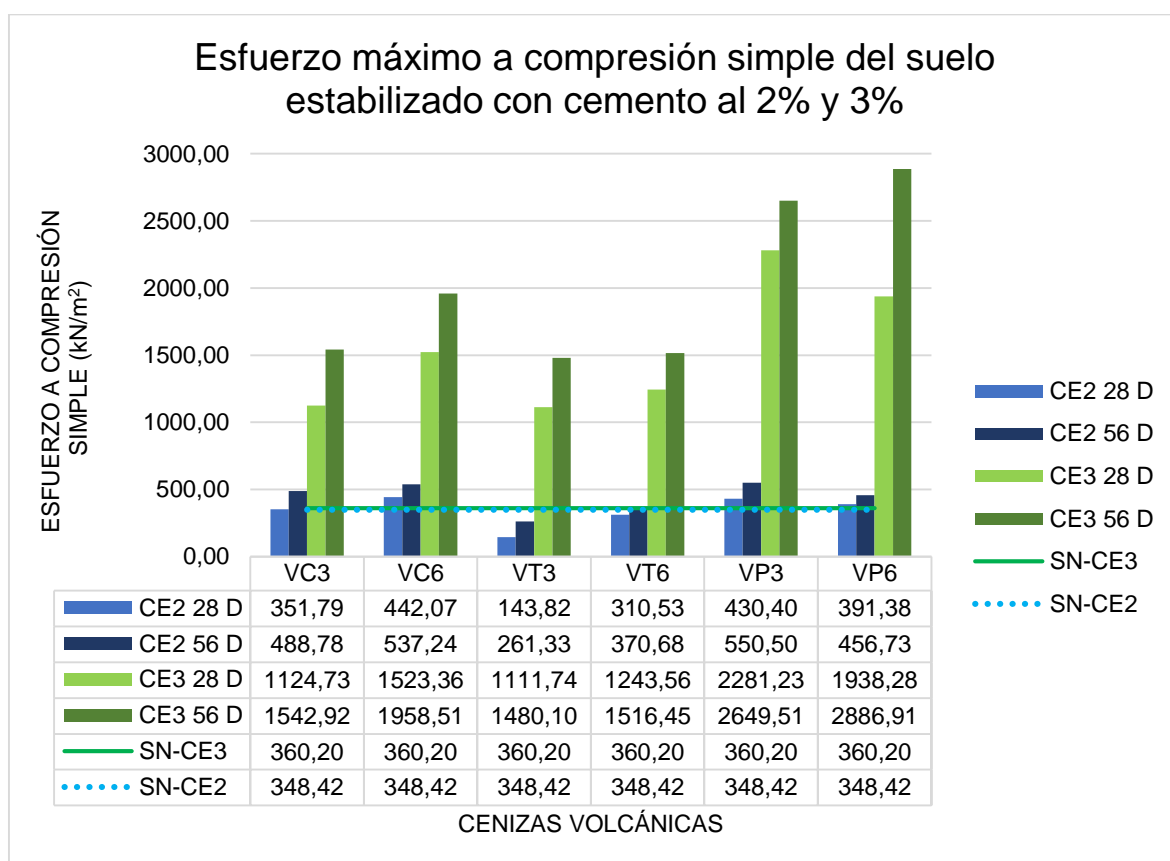


Figura 89. Esfuerzo máximo a compresión simple del suelo estabilizado con cemento al 2% y 3%

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

En la Figura 89, las líneas que representan los valores de las muestras patrón se visualizan sobrepuestas, debido a que los esfuerzos a compresión simple obtenidos en estos especímenes son cercanos entre ellos, siendo de 348.42 kN/m² y 360.20 kN/m², para SN-Ce2 y SN-Ce3, respectivamente.

Se observa que el esfuerzo a compresión simple es directamente proporcional al tiempo de curado, dándose el mayor valor en aquellas con 56 días de reposo (sin alterar la humedad de la muestra). Este tiempo de curado es necesario ya que la ceniza volcánica junto con este activador se comporta como un material cementante, lo cual requiere de una debida hidratación para alcanzar la resistencia a la compresión simple mayor.

Es importante mencionar que las dosificaciones con ceniza volcánica del Tungurahua son las que presentan los valores más bajos, e incluso en aquellas que se añade un 2% de activador no alcanza al esfuerzo a compresión simple último de la muestra patrón (SN-Ce2). La mezcla del 6 % de ceniza volcánica del Guagua Pichincha con 3% de cemento (VC6-Ce3) es la que tiene el mayor aumento en la resistencia a la compresión simple entre todas.

En la Figura 90 se observa que todas las muestras con 3% de cemento tienen un incremento en el esfuerzo máximo a compresión de más del 100%, llegando hasta un 700% de las resistencias a compresión de las muestras patrón. En el caso del suelo estabilizado con ceniza del volcán Tungurahua y 2% de activador, presentan un decrecimiento del esfuerzo a compresión de entre el 50% y 10%, mientras que el resto de las dosificaciones con el mismo porcentaje de activador, tienen un incremento de solo el 6% al 54%; dicho esto, es posible descartar como óptimas a estas mezclas.

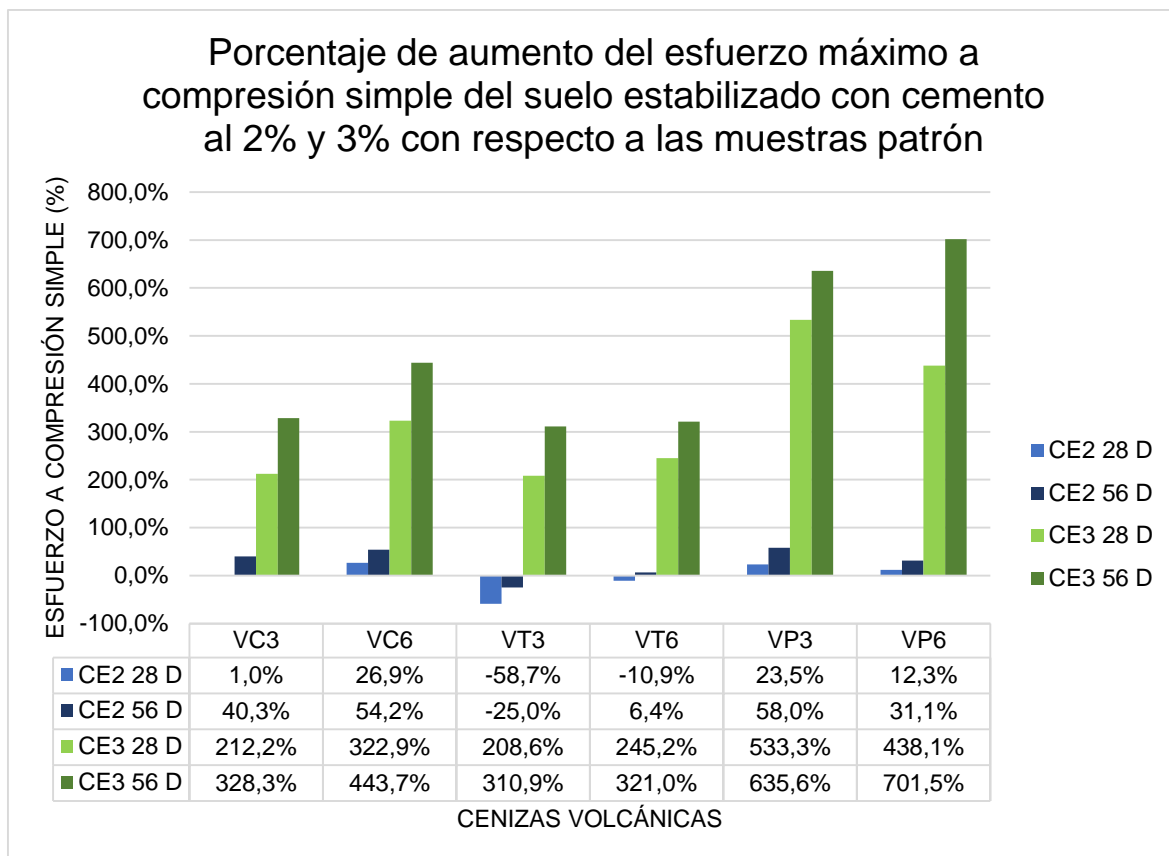


Figura 90. Porcentaje de aumento del esfuerzo máximo a compresión simple del suelo estabilizado con cemento al 2% y 3% con respecto a las muestras patrón SN-Ce2 y SN-Ce3

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Se visualiza que el porcentaje de aumento del esfuerzo a compresión simple en todas las estabilizaciones con cemento y cenizas volcánicas tuvo resultados positivos con respecto al suelo natural (ver Figura 91) teniendo incrementos de más del 100%; de igual manera, se puede apreciar que los mejores rendimientos se obtuvieron al adicionar 3% del activador, resultando en esfuerzos a compresión mayores al 3000%.

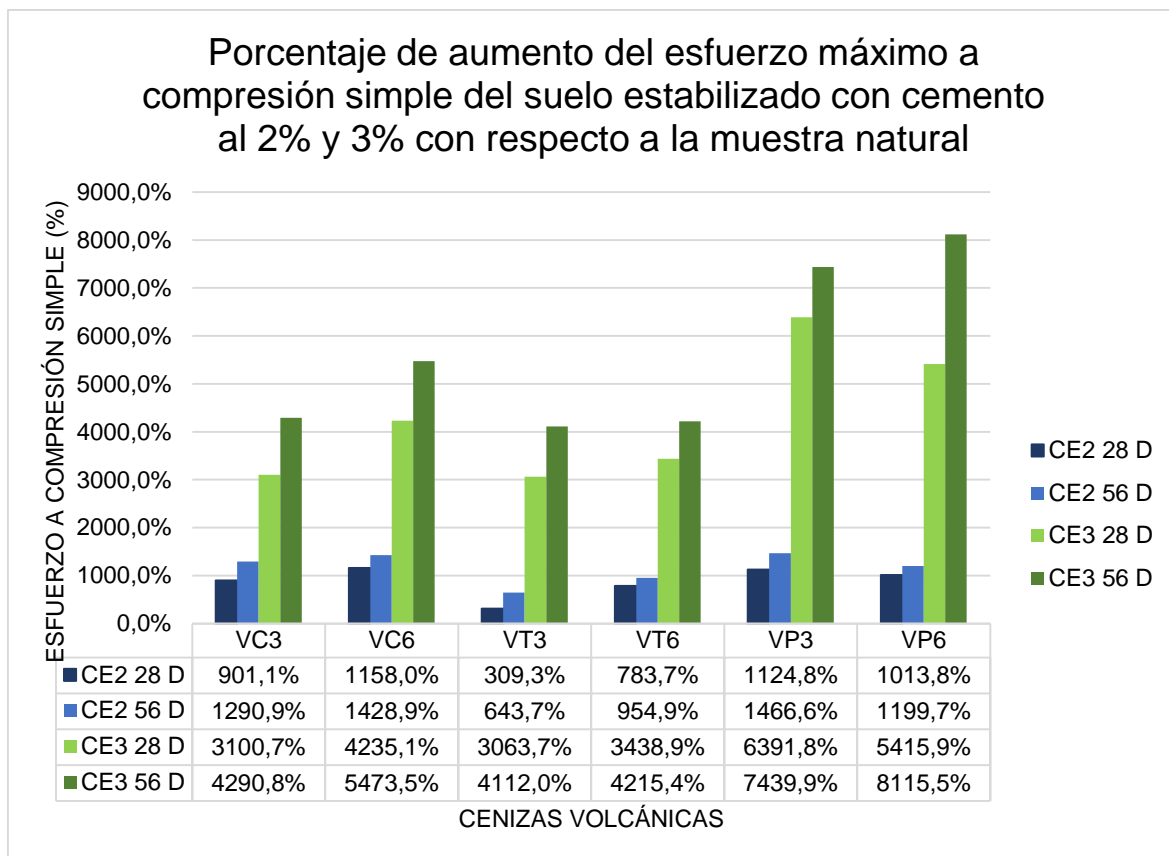


Figura 91. Porcentaje de aumento del esfuerzo máximo a compresión simple del suelo estabilizado con cemento al 2% y 3% con respecto a la muestra natural SN
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

En la Figura 92, se aprecia un aumento significativo del esfuerzo máximo a compresión con respecto a las muestras patrón en todos los especímenes estabilizados con cal; donde la de mayor incremento es la dosificación con ceniza del volcán Cotopaxi con 3% de activador, y la menor siendo aquella del volcán Tungurahua con 2% de cal; de igual manera, se presenta una proporcionalidad directa entre la resistencia última a compresión simple con el tiempo de curado y el porcentaje de activador añadido. Esto puede darse debido a que la cal junto con el suelo produce mayor cantidad de silicatos de calcio hidratados, portlandita y calcita, siendo los responsables de las propiedades resistentes adquiridas por la reacción al momento de mezclarlas.

En el caso de la puzolana, se observa que la mayoría de las muestras en las que se añadió 3% de ceniza tiene mayores valores de resistencia a compresión con respecto a las del 6% de adición, este efecto sucede debido a las reacciones internas producidas con la cal, siendo evidente que un alto porcentaje de ceniza

(6% en peso) tiene resultados desfavorables frente al 3% de puzolana, por lo cual se considera a esta última como la cantidad idónea para darse su activación.

La dosificación que presenta el mayor valor de resistencia es la de 6% de ceniza del volcán Cotopaxi con 3% de cal (VC6-Ca3) a los 56 días de curado con un valor de 4459.04 kN/m²; y para los 28 días de curado, la estabilización óptima fue con 3% de la misma puzolana y 2% de activador (VC3-Ca2) con 3837.47 kN/m².

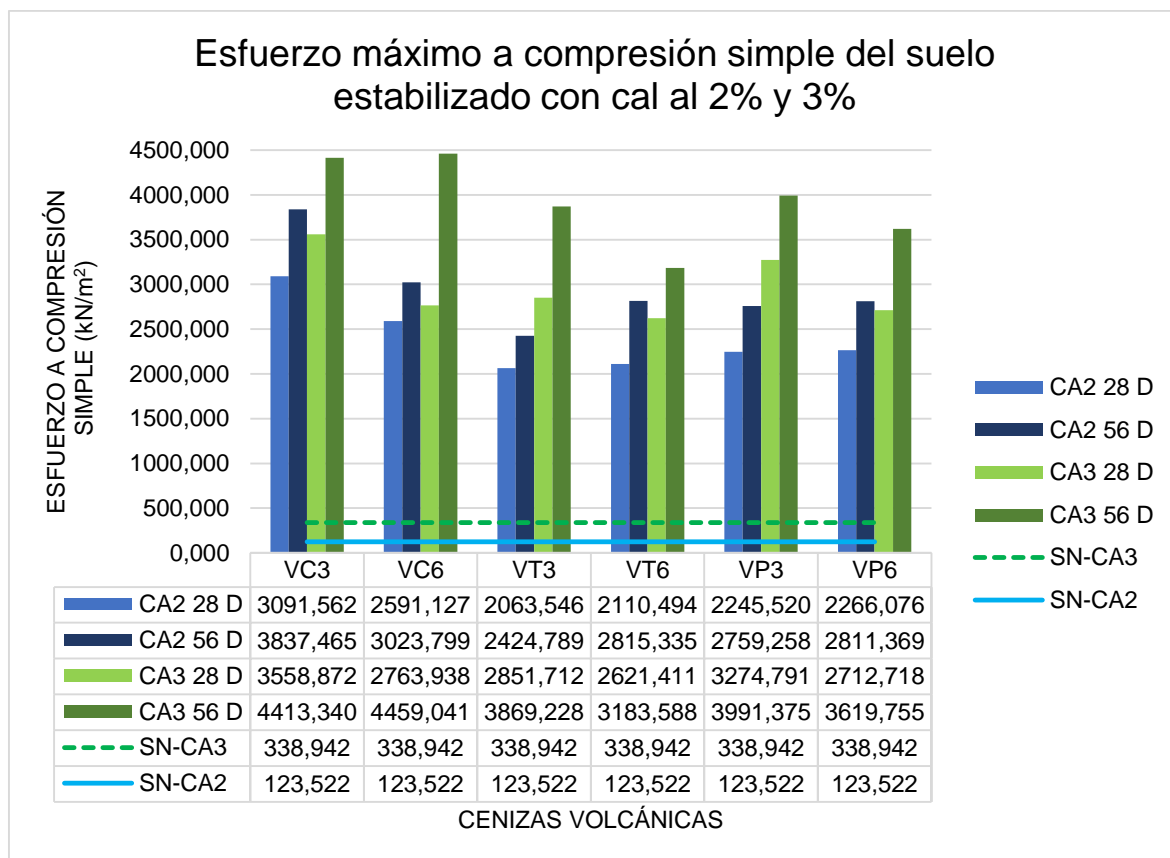


Figura 92. Esfuerzo máximo del suelo estabilizado con cal al 2% y 3%
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

En la Figura 93 se observa que todas las muestras tienen un incremento representativo del esfuerzo a compresión, puesto que superan el 500% hasta un 2500% respecto a las muestras patrón. Es interesante mencionar que las mezclas con las mayores variaciones son con 2% de cal, presentando aumentos entre 1500% y 3000%, siendo aquella con 3% de ceniza del volcán Cotopaxi la de más relevancia. Por otro lado, para las estabilizaciones con 3% de activador, el crecimiento de la resistencia está entre el 600% y 1200%.

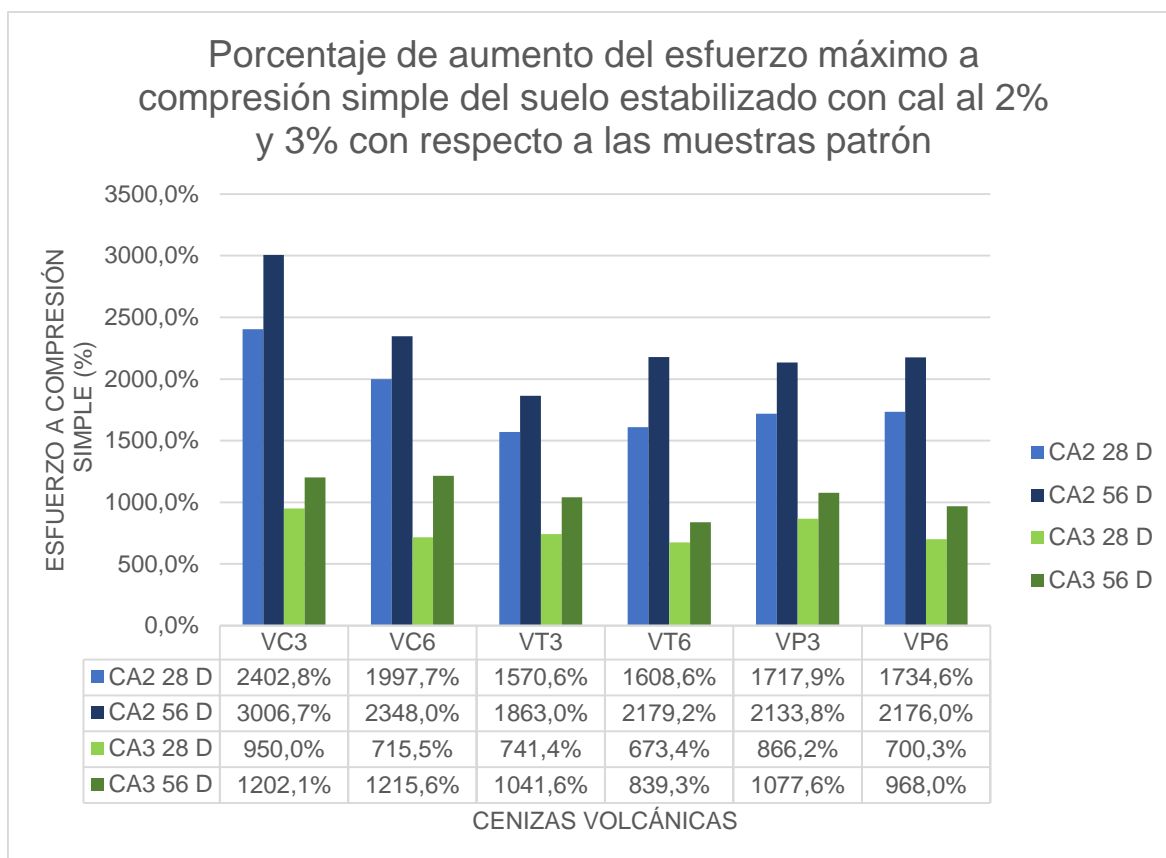


Figura 93. Porcentaje de aumento del esfuerzo máximo a compresión simple del suelo estabilizado con cal al 2% y 3% con respecto a las muestras patrón SN-Ca2 y SN-Ca3

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

El porcentaje de crecimiento del esfuerzo a compresión simple con respecto al suelo natural se presenta en la Figura 94, de la cual se puede observar que el incremento es favorable para todas las mezclas, resultando en aumentos entre el 5000% y 12000%. Se mantiene una proporcionalidad directa entre el tiempo de curado y la resistencia a compresión, puesto que la cal junto con la ceniza volcánica y el suelo se comportan como un material cementante, requiriendo de su hidratación para la formación de silicatos de calcio (CSH) y así alcanzar resistencias a compresión simple favorables. Al igual que en las Figuras 92 y 93, se aprecia que la puzolana del volcán Cotopaxi presenta los mejores resultados en comparación con las cenizas de los otros dos volcanes.

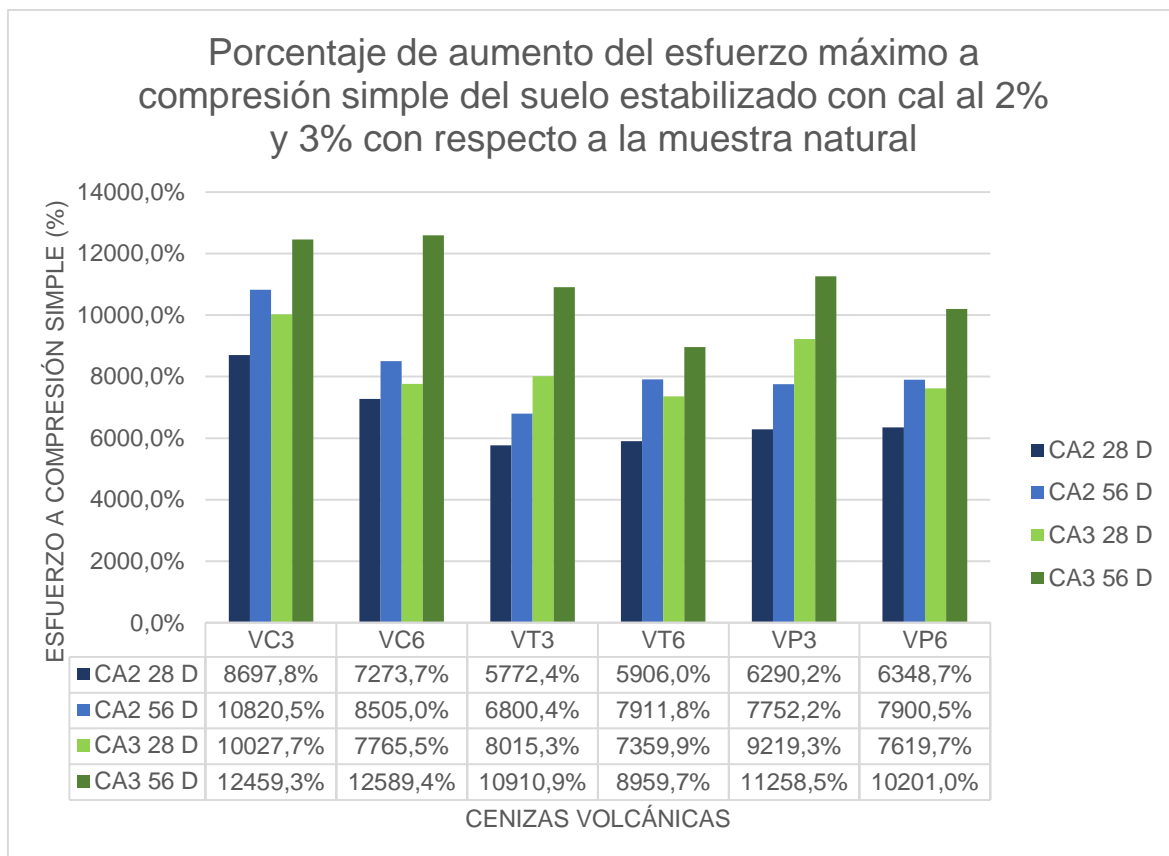


Figura 94. Porcentaje de aumento del esfuerzo máximo a compresión simple del suelo estabilizado con cal al 2% y 3% con respecto a la muestra natural SN.

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

En la Figura 95, se aprecia un aumento del esfuerzo máximo a compresión simple con respecto al suelo natural en todos los especímenes estabilizados con hidróxido de sodio; donde la de mayor incremento es la dosificación con ceniza del volcán Cotopaxi con 3% de activador, y la menor siendo aquella del volcán Tungurahua con 2% de hidróxido de sodio. Se presenta una proporcionalidad directa entre la resistencia a compresión última con el tiempo de curado y la cantidad de hidróxido de sodio añadida, siendo las mezclas óptimas aquellas con 3% de activador y 56 días de curado. Esto se puede dar ya que, al usar hidróxido de sodio como activador puzolánico, el principal producto debido a la reacción interna con la ceniza volcánica son los geles CSH (silicatos cálcicos hidratados), generando propiedades cementantes y de resistencia en el suelo estabilizado.

La mezcla que presenta el mayor valor de resistencia es la de 6% de ceniza del volcán Cotopaxi, con 3% de hidróxido de sodio (VC6-Hi3) a los 28 y 56 días de curado con valores de 621.54 kN/m² y 695.96 kN/m², respectivamente.

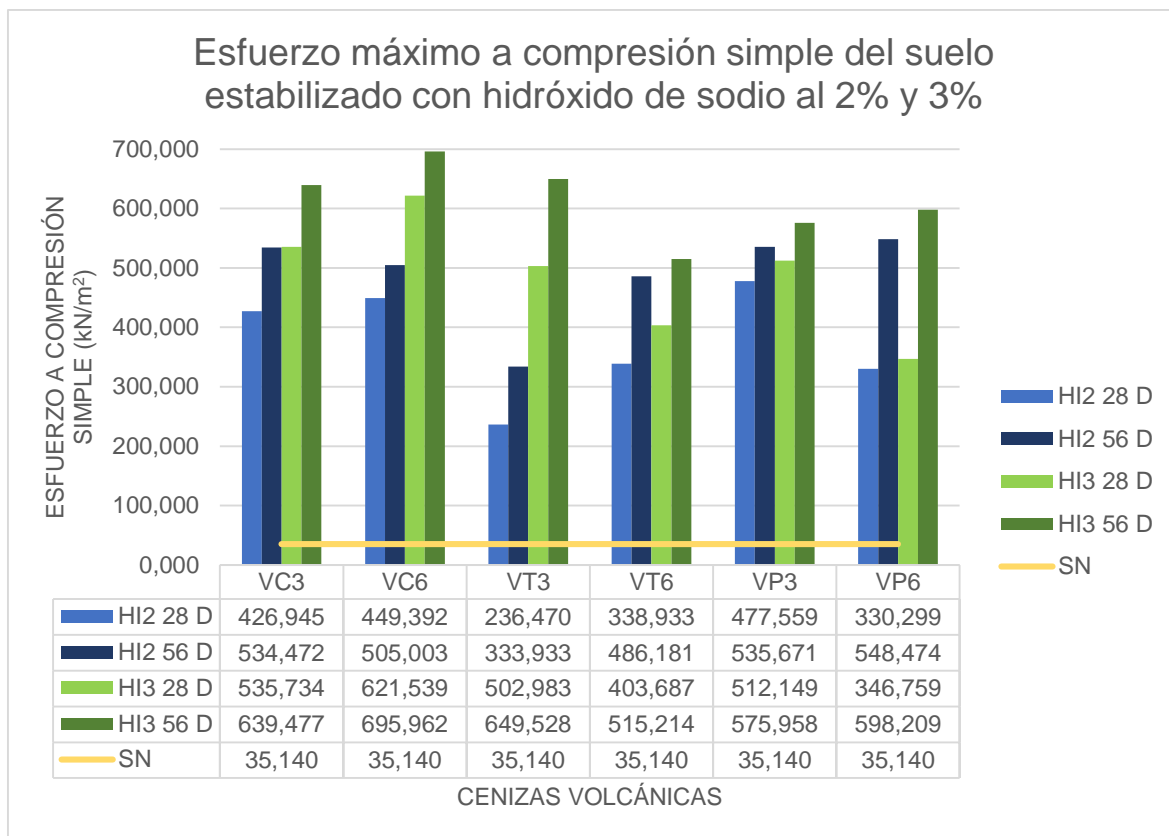


Figura 95. Esfuerzo máximo a compresión simple del suelo estabilizado con hidróxido de sodio al 2% y 3%

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

En la Figura 96, se observa el porcentaje de incremento de las muestras respecto al suelo natural, donde se tiene un aumento en todos los especímenes entre 500% y 1900%. A pesar de que los porcentajes mostrados son altos, sus valores de resistencia a compresión última son los menores entre los resultados obtenidos en las estabilizaciones con cal y cemento. Esto puede deberse a la cantidad de aditivo usado para la estabilización en cada método de activación, ya que en el caso del cemento y la cal, por si solos pueden usarse como estabilizadores de suelo, por lo cual al adicionar la ceniza volcánica, se obtiene un porcentaje en peso correspondiente a la suma de ambos materiales (activador + puzolana); por otro lado, en la estabilización con hidróxido de sodio se considera como aditivo únicamente la cantidad de puzolana usada, mas no la suma con NaOH, puesto que éste trabaja netamente como activador, sin tener reacción alguna frente al suelo.

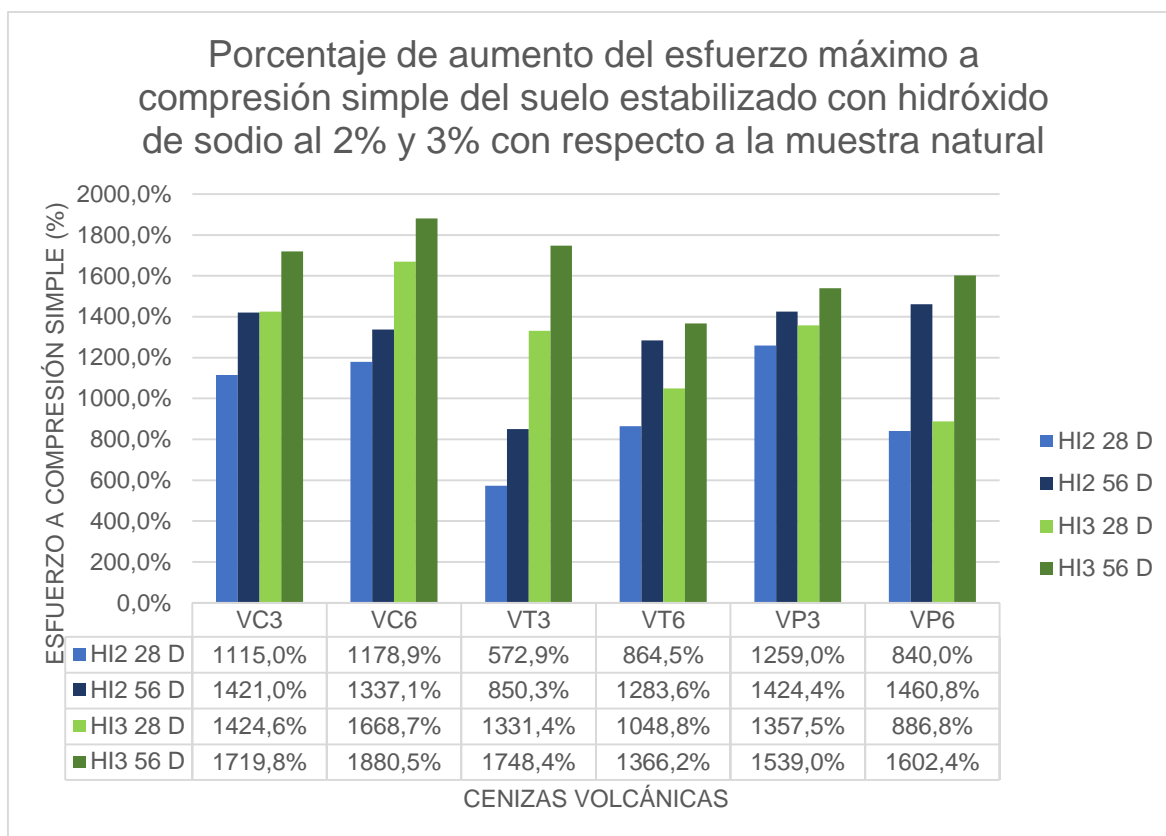


Figura 96. Porcentaje de aumento del esfuerzo máximo a compresión simple del suelo estabilizado con cal al 2% y 3% con respecto a la muestra natural SN.

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Analizando la dosificación en la que interviene la cal en cada ceniza, para el volcán Cotopaxi, la muestra VC6-Ca3, alcanzó un valor de 4459.04 kN/m² correspondiente a un aumento de 1215.6%; en el caso del volcán Tungurahua, la muestra VT3-Ca3 dio la mejor resistencia, siendo de 3869.23 kN/m² con un porcentaje de crecimiento de 1041.6%; y el volcán Guagua Pichincha, con la muestra VP3-Ca3, presentando un esfuerzo a compresión simple de 3991.38 kN/m² y un mejoramiento de 1077.6%, todas con respecto a la muestra patrón SN-Ca3.

En el caso del cemento en cada ceniza, para el volcán Cotopaxi, la muestra VC6-Ce3, alcanzó un valor de 1958.51 kN/m² correspondiente a un aumento de 443.7%; en el caso del volcán Tungurahua, la muestra VT6-Ce3 dio la mejor resistencia a compresión, siendo de 1516.45 kN/m² con un porcentaje de crecimiento de 321.0%; y el volcán Guagua Pichincha, con la muestra VP6-Ce3, presentando un esfuerzo a compresión de 2886.91 kN/m² y un mejoramiento de 701.5%, todas con respecto a la muestra patrón SN-Ce3.

Con el hidróxido de sodio en todas las cenizas, para el volcán Cotopaxi, la muestra VC6-Hi3, alcanzó un valor de 695.96 kN/m² correspondiente a un aumento de 1880.5%; en el caso del volcán Tungurahua, la muestra VT3-Hi3 dio la mejor resistencia a compresión, siendo de 649.53 kN/m² con un porcentaje de crecimiento de 1748.4%; y el volcán Guagua Pichincha, con la muestra VP6-Hi3, presentando un esfuerzo último de 598.21 kN/m² y un mejoramiento de 1602.4%, todas con respecto al suelo natural SN.

Los resultados explicados previamente se muestran en la Tabla 56.

Tabla 56

Resistencias últimas del ensayo a compresión simple máximas para cada volcán con adición de 3% de activador

MUESTRA	RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE (kN/m ²)	MEJORAMIENTO CON RESPECTO A MUESTRA PATRÓN (%)	MEJORAMIENTO CON RESPECTO AL SUELO NATURAL (%)
VC6-Ca3	4459,04	1215,6	12589,4
VT3-Ca3	3869,23	1041,6	10910,9
VP3-Ca3	3991,38	1077,6	11258,5
VC6-Ce3	1958,51	443,7	5473,5
VT6-Ce3	1516,45	321,0	4215,4
VP6-Ce3	2886,91	701,5	8115,5
VC6-Hi3	695,96	-	1880,5
VT3-Hi3	649,53	-	1748,4
VP6-Hi3	598,21	-	1602,4

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Finalmente, se evidencia que la resistencia a compresión simple de las dosificaciones con cal supera notoriamente a los otros activadores en todas las cenizas volcánicas, obteniendo a los 56 días de curado los mejores resultados. Analizando cada volcán, se presentan como estabilizaciones óptimas los especímenes VC6-Ca3, VT3-Ca3 y VP3-Ca3; siendo la ceniza del volcán Cotopaxi la más viable de las tres al momento de estabilizar el suelo.

4.2.3. CORTE DIRECTO

En la Figura 97 se observa la influencia del cemento como activador, donde los mayores valores de cohesión se dan en las estabilizaciones con ceniza del volcán Tungurahua; en el caso de las mezclas con ceniza del volcán Cotopaxi ninguna

alcanza el resultado obtenido con las muestras patrón, reflejándose un porcentaje de reducción entre el 17% y 30% (ver Figura 98), lo cual puede ser debido a que la cantidad de puzolana adicionada con cemento, no fue la suficiente para generar una reacción entre ambos materiales y así sobrepasar las muestras patrón (SN-Ce2 y SN-Ce3). Por otro lado, la Figura 99 evidencia que todas las mezclas incrementaron el valor de la cohesión con respecto al suelo natural, siendo la ceniza del volcán Tungurahua la que alcanzó los mejores resultados aumentando hasta en un 500%.

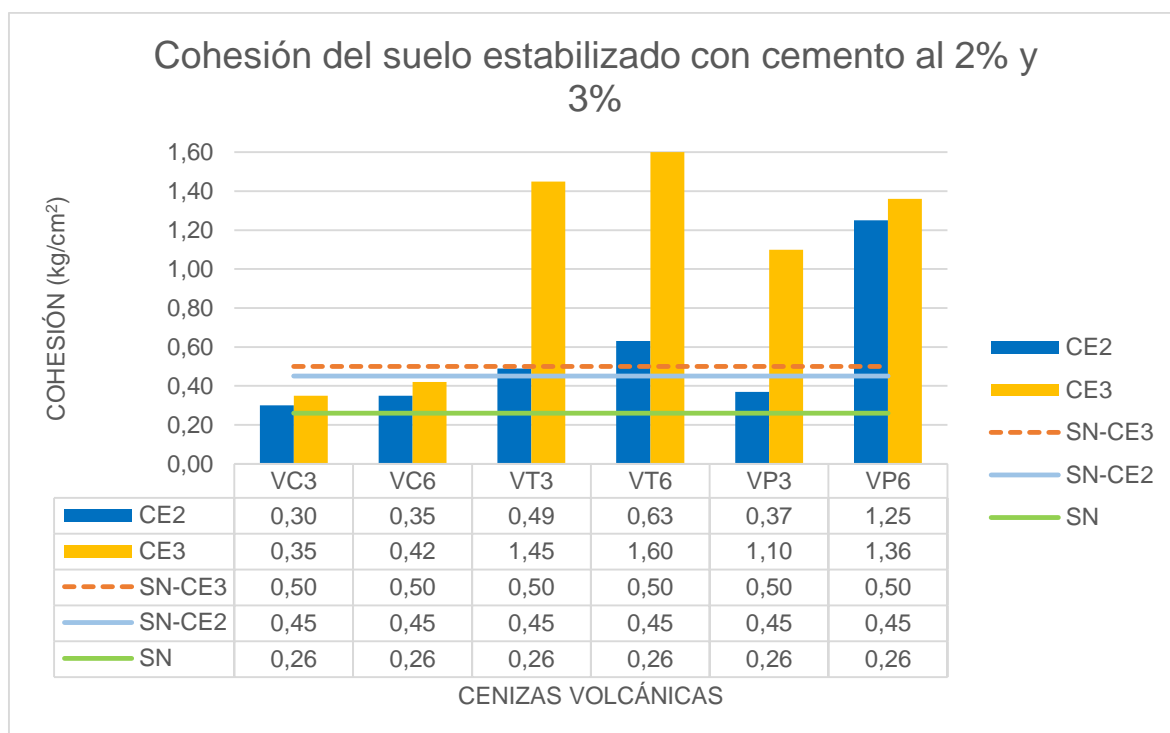


Figura 97. Cohesión del suelo estabilizado con cemento al 2% y 3%.
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

De acuerdo con la Figura 98 y 99, la adición del cemento con ceniza volcánica presenta incrementos considerables en la cohesión para los especímenes del volcán Tungurahua con la mayor cantidad de activador, siendo este porcentaje de aumento de casi el 200% con respecto a la muestra patrón y 500% en comparación al suelo natural. Para la puzolana del volcán Guagua Pichincha, igualmente existe mejoramiento de la cohesión mayor al 100% y 300% sobre el valor de la muestra patrón y suelo natural, respectivamente.

Cabe mencionar que la cantidad de puzolana y cemento influye directamente en el mejoramiento de la cohesión en todas las cenizas volcánicas, por lo tanto, es posible definir que estos dos materiales ayudan al aumento de la resistencia cortante del suelo. Este efecto se da debido a la modificación de la estructura del suelo al adicionar una cierta cantidad de finos (cemento y puzolana), los cuales llenan los vacíos al momento de su compactación.

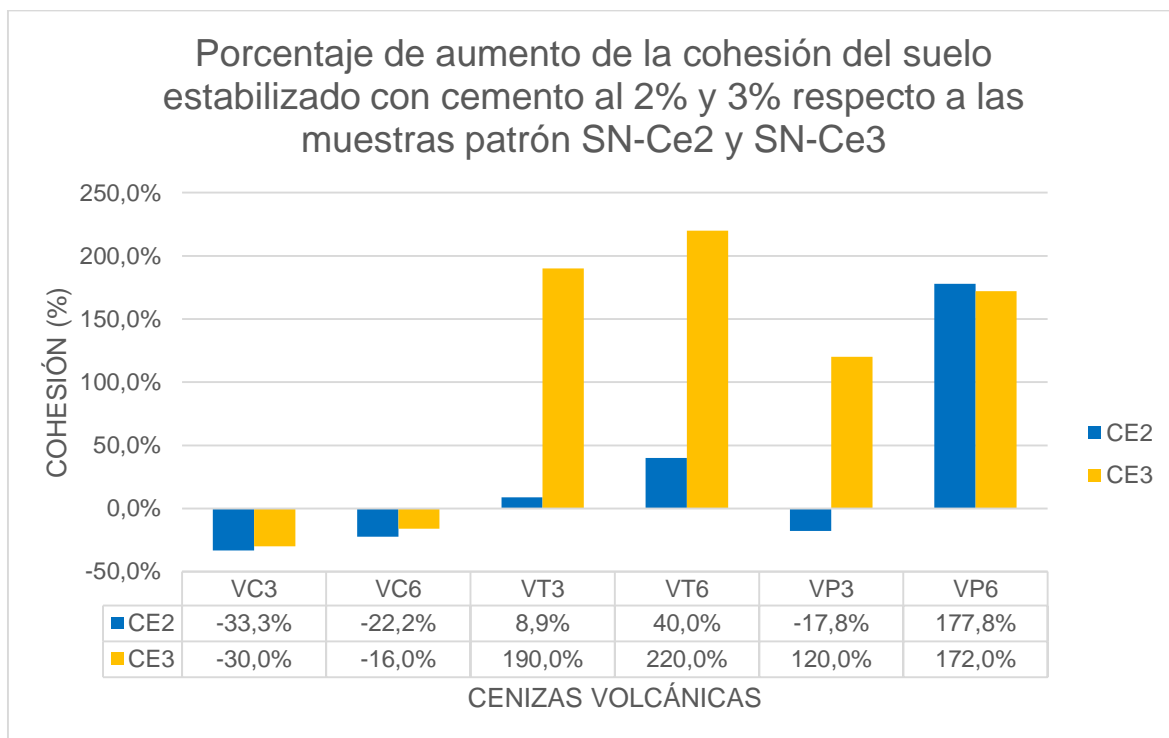


Figura 98. Porcentaje de aumento de la cohesión del suelo estabilizado con cemento al 2% y 3% con respecto a las muestras patrón SN-Ce2 y SN-Ce3
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

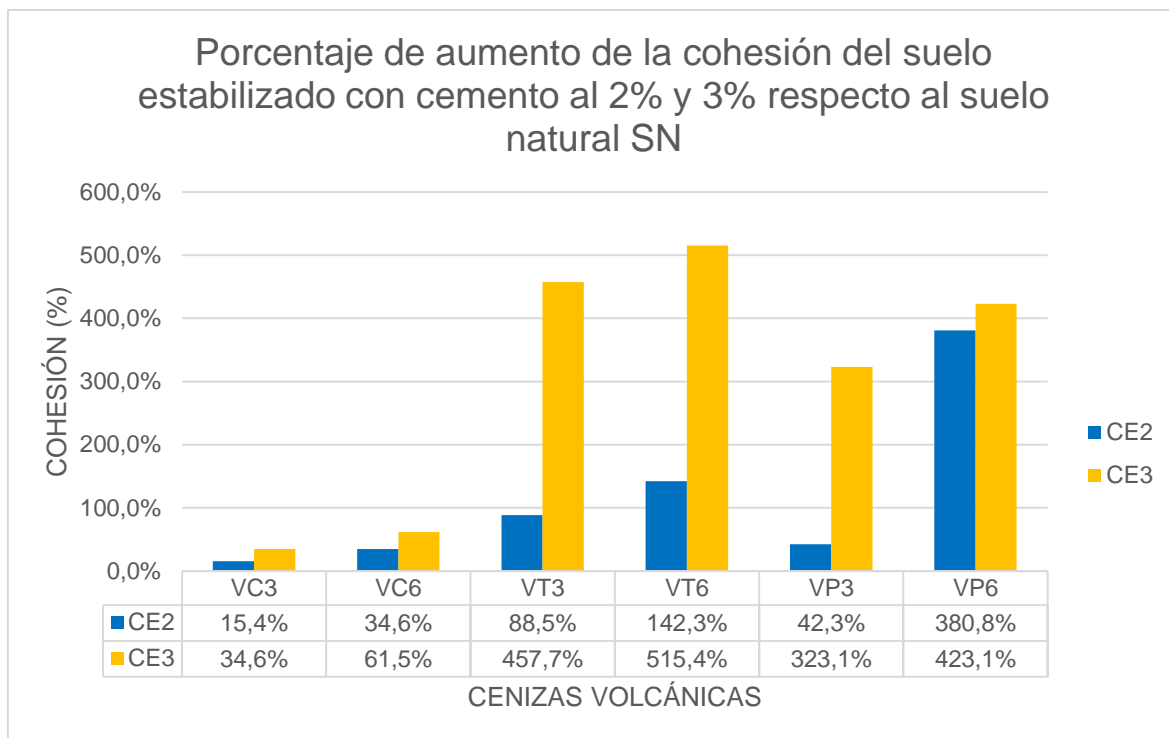


Figura 99. Porcentaje de aumento de la cohesión del suelo estabilizado con cemento al 2% y 3% con respecto al suelo natural SN
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

En las Figuras 100, 101 y 102 se evidencia un incremento del ángulo de fricción en todas las muestras estabilizadas con respecto a los especímenes patrón y el suelo natural, siendo la más alta la correspondiente a la dosificación con 3% de puzolana del volcán Guagua Pichincha, con un incremento cercano en ambos porcentajes de cemento.

Se demuestra que el cemento junto con las puzolanas mejora la fricción interna de las partículas, dando como resultado valores mayores en el ángulo de fricción. Es interesante mencionar que esta propiedad mecánica del suelo se ve afectada de manera inversa con el porcentaje añadido de puzolana y cemento, ya que ambos materiales finos, al modificar la estructura interna del suelo, tienden a disminuir la fricción que generan las partículas gruesas del suelo.

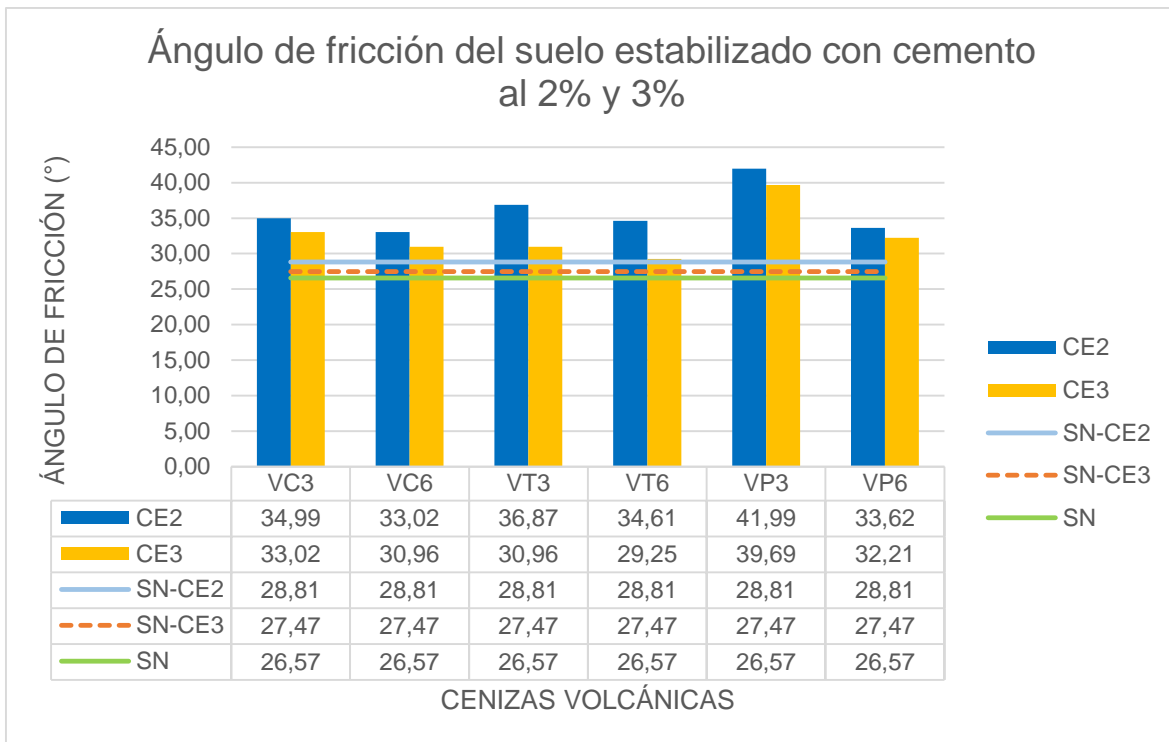


Figura 100. Ángulo de fricción del suelo estabilizado con cemento al 2% y 3%.
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

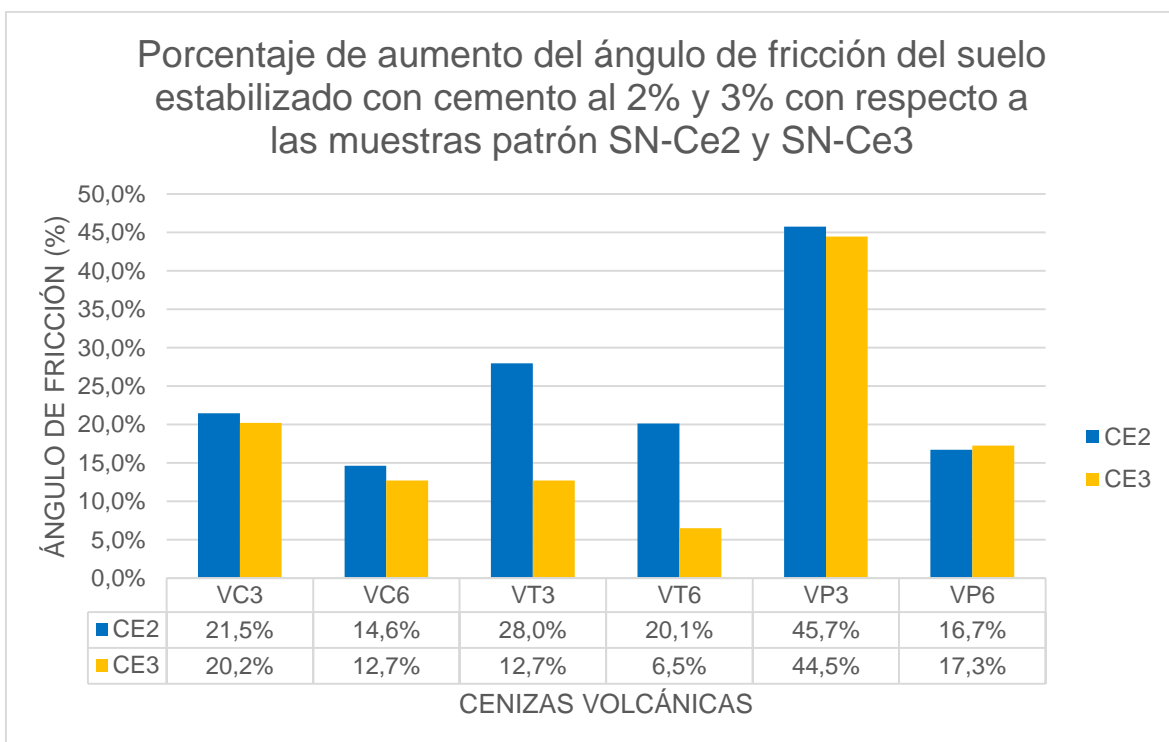


Figura 101. Porcentaje de aumento del ángulo de fricción del suelo estabilizado con cemento al 2% y 3% respecto a las muestras patrón SN-Ce2 y SN-Ce3
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

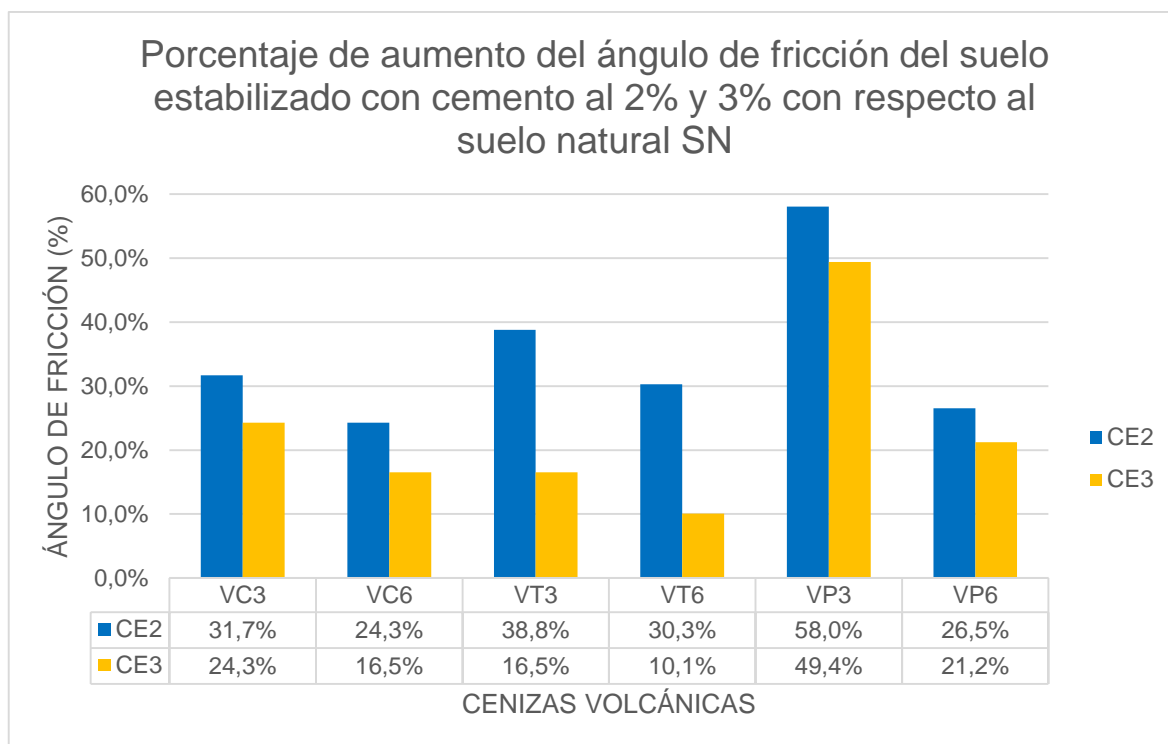


Figura 102. Porcentaje de aumento del ángulo de fricción del suelo estabilizado con cemento al 2% y 3% respecto al suelo natural SN.

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

En las dosificaciones con cal como estabilizador al 3%, no se alcanza la cohesión que se obtiene con la muestra patrón (SN-Ca3), ver Figura 103; mientras que para las mezclas con 2% de activador, todas superan el valor de cohesión de la muestra SN-Ca2, pero manteniéndose por debajo del resultado de la muestra patrón SN-Ca3. Este efecto ocurre ya que la cal, por si sola, es un aditivo que funciona favorablemente como estabilizador de suelo, siendo evidente que en el caso de la muestra natural con 3% de cal, el aditamento de puzolana actúa de manera negativa en ambos porcentajes (3% y 6% de ceniza volcánica). En la Figura 104, se confirma que únicamente las mezclas con 2% de cal activaron a la puzolana de manera positiva, llegando hasta un valor del 200% para la dosificación VC6-Ca2.

Pese a esto, se mantiene una tendencia de incremento dependiente de la cantidad de puzolana y activador, la cual se aprecia en la Figura 105, donde todas las estabilizaciones aumentaron la cohesión en porcentajes mayores al 200%, con respecto al suelo natural, siendo las cenizas de los volcanes Tungurahua y Cotopaxi las que presentaron los mejores resultados.

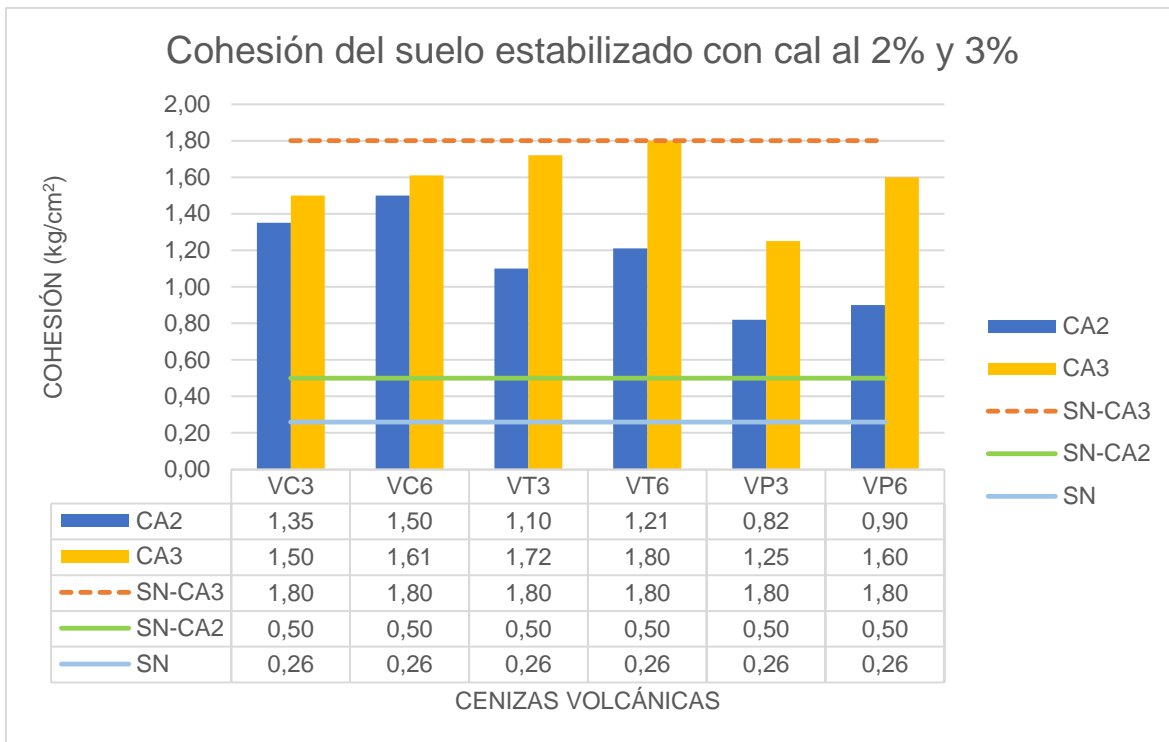


Figura 103. Cohesión del suelo estabilizado con cal al 2% y 3%.
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

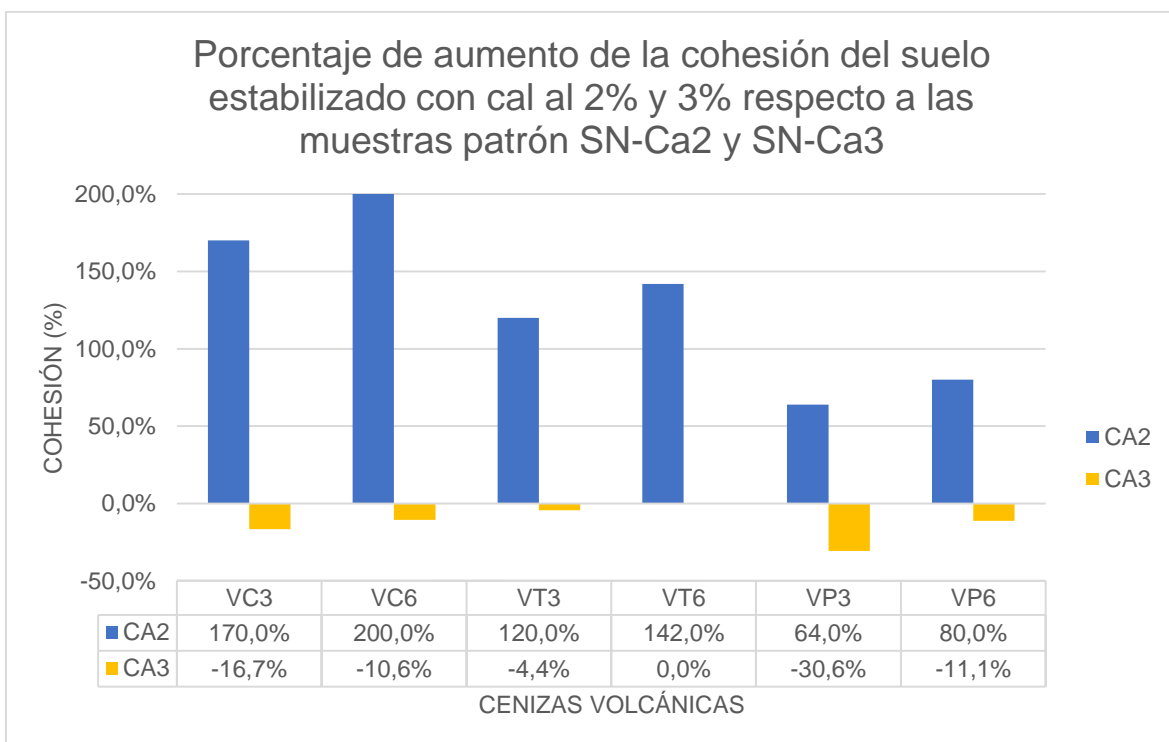


Figura 104. Porcentaje de aumento de la cohesión del suelo estabilizado con cal al 2% y 3% respecto a muestras patrón.
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

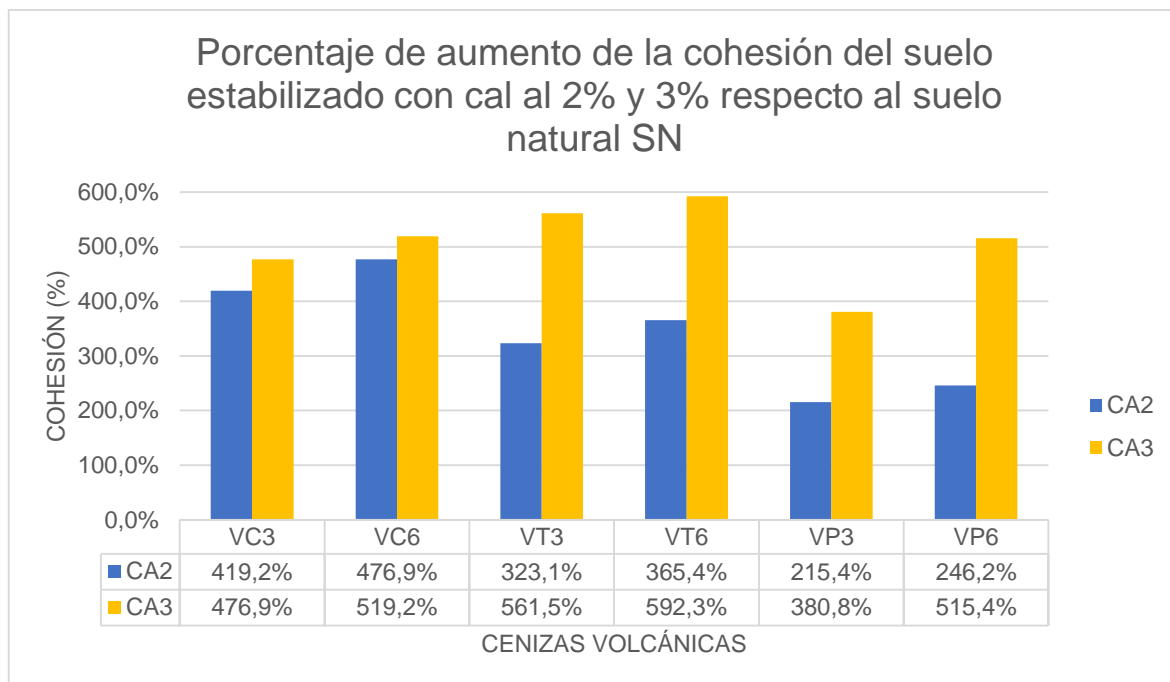


Figura 105. Porcentaje de aumento de la cohesión del suelo estabilizado con cal al 2% y 3% respecto a muestras patrón.

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

El ángulo de fricción en las muestras estabilizadas con cal presenta un mejoramiento de este valor en la mayoría de los especímenes, siendo la de mayor resultado aquella con 3% de ceniza volcánica del Guagua Pichincha y 2% de cal (VP3-Ca2), ver Figura 106. Es interesante mencionar que esta propiedad mecánica del suelo se ve afectada de manera inversa con el porcentaje añadido de ceniza y cal, puesto que, al alterar la estructura interna del suelo con la adición de finos, se disminuye la fricción que genera el material grueso del suelo, dando como resultando ángulos de fricción menores.

En la Figura 107 se evidencia que para las dosificaciones con 6% de puzolana del volcán Cotopaxi, se ven reducidos los ángulos de fricción en ambos porcentajes de activador con respecto a las muestras patrón (SN-Ca2 y SN-Ca3) en un 10%, así como la mezcla VP6-Ca3, en la que se reduce un porcentaje de solo el 2%, estos decrecimientos pueden darse debido a reacciones internas que ocurren entre la cal y las puzolanas, donde se observa que el 6% de las cenizas volcánicas superan la cantidad óptima para ser activadas, mientras que una cantidad de 3% presenta resultados favorables. Los aumentos relevantes se encuentran en un

intervalo del 20% al 30%, siendo la muestra VP3-Ca2 la que alcanza la máxima variación con 31.8%.

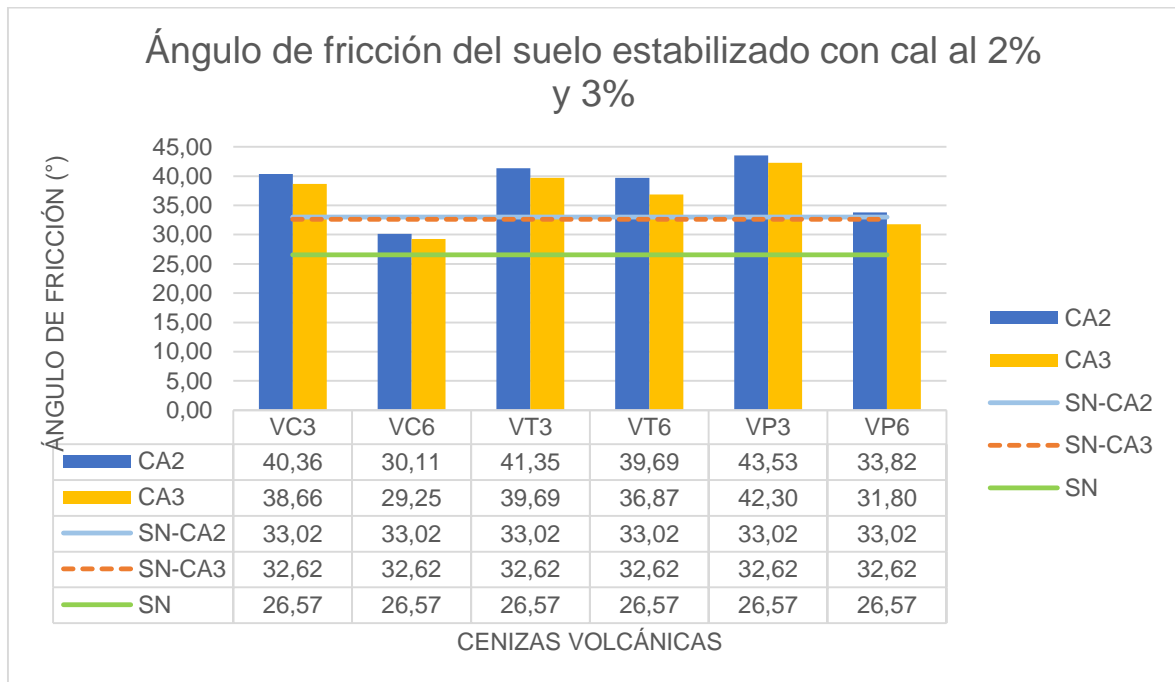


Figura 106. Ángulo de fricción del suelo estabilizado con cal al 2% y 3%.
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

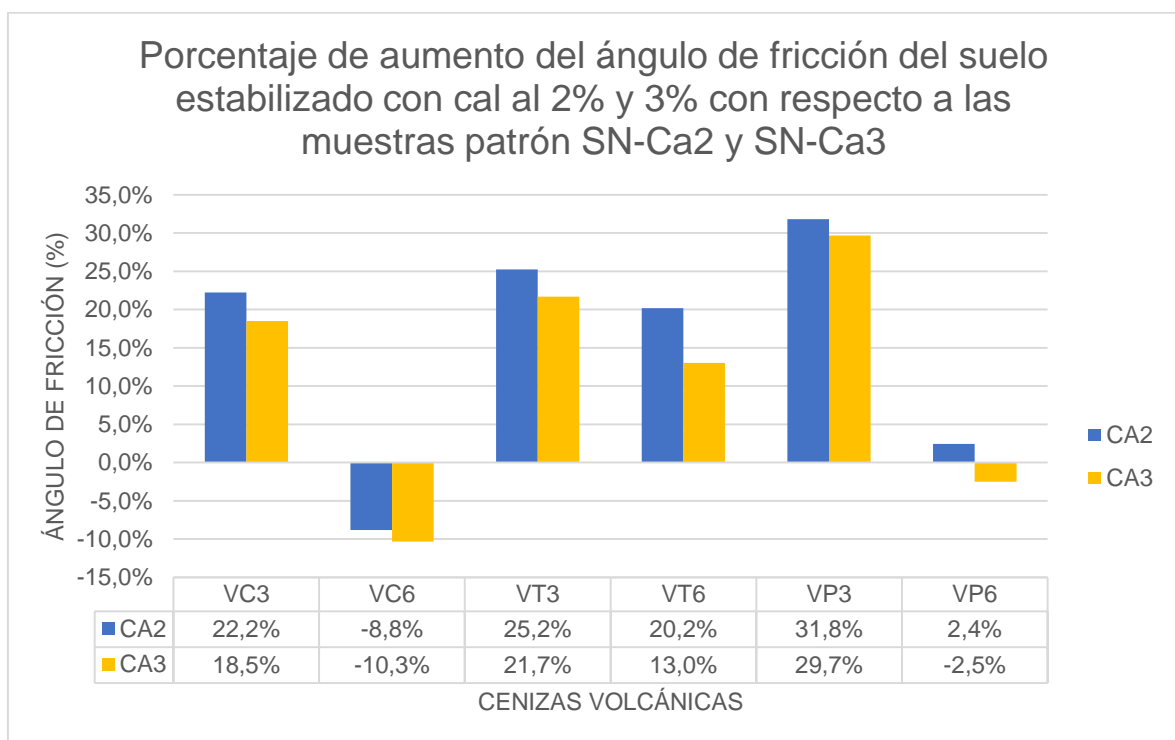


Figura 107. Porcentaje de aumento del ángulo de fricción del suelo estabilizado con cal al 2% y 3% con respecto a las muestras patrón SN-Ca2 y SN-Ca3.
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

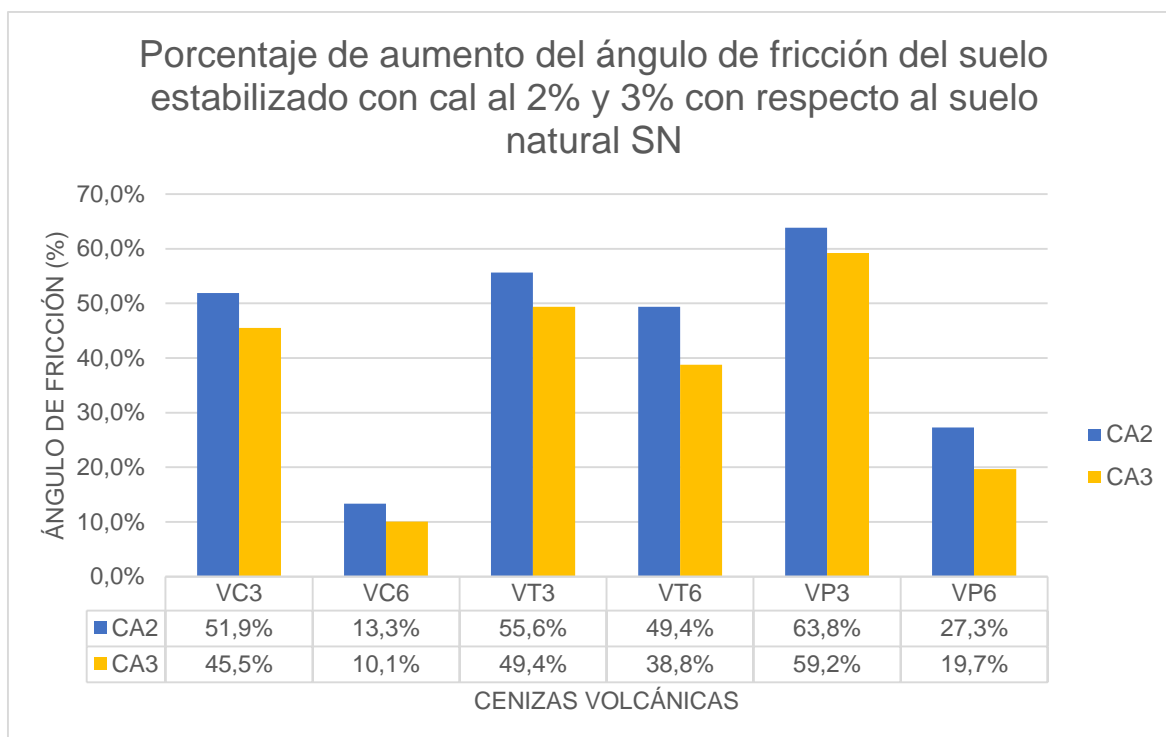


Figura 108. Porcentaje de aumento del ángulo de fricción del suelo estabilizado con cal al 2% y 3% con respecto al suelo natural SN

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

La Figura 109 presenta un mejoramiento de la cohesión en todas las mezclas cuando se adiciona hidróxido de sodio. Es evidente que esta propiedad mecánica depende de la cantidad de activador a usarse y del tipo de ceniza volcánica, siendo relevante la cohesión en la estabilización con ceniza del volcán Tungurahua, incrementando hasta 0.68 kg/cm^2 en la dosificación VT6-Hi3; mientras que, las puzolanas de los volcanes Cotopaxi y Guagua Pichincha no presentan mejorías considerables con respecto al suelo natural.

Cabe mencionar que se observa una relación directamente proporcional entre la cohesión y el porcentaje de puzolana con activador, debido a que la adición de las cenizas volcánicas incrementa la cantidad de material fino en el suelo y modifica su estructura, mientras que el hidróxido de sodio ayuda a que la puzolana se comporte como material cementante, aumentando así la resistencia cortante del suelo.

De acuerdo con la Figura 110, los porcentajes de incrementos más altos están en el rango de 90% y 160% en el suelo con ceniza del volcán Tungurahua, mientras que para las otras puzolanas se mantiene en un aumento entre el 7% y 35%.

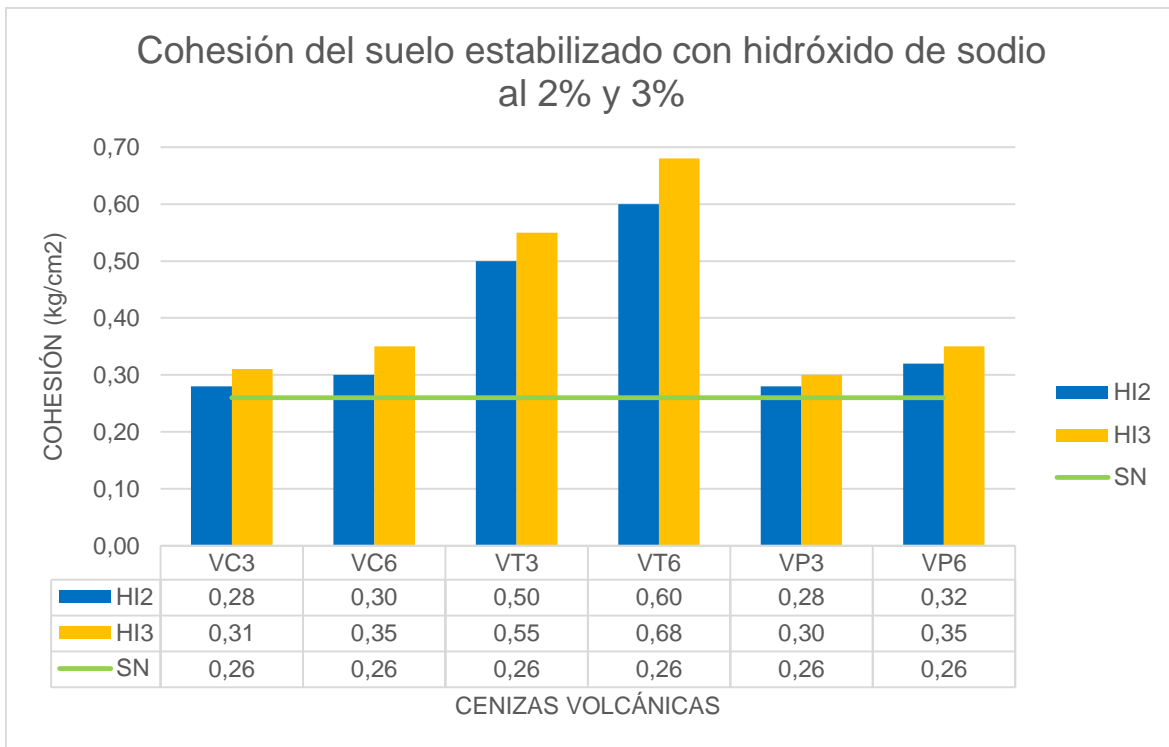


Figura 109. Cohesión del suelo estabilizado con hidróxido de sodio al 2% y 3%.
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

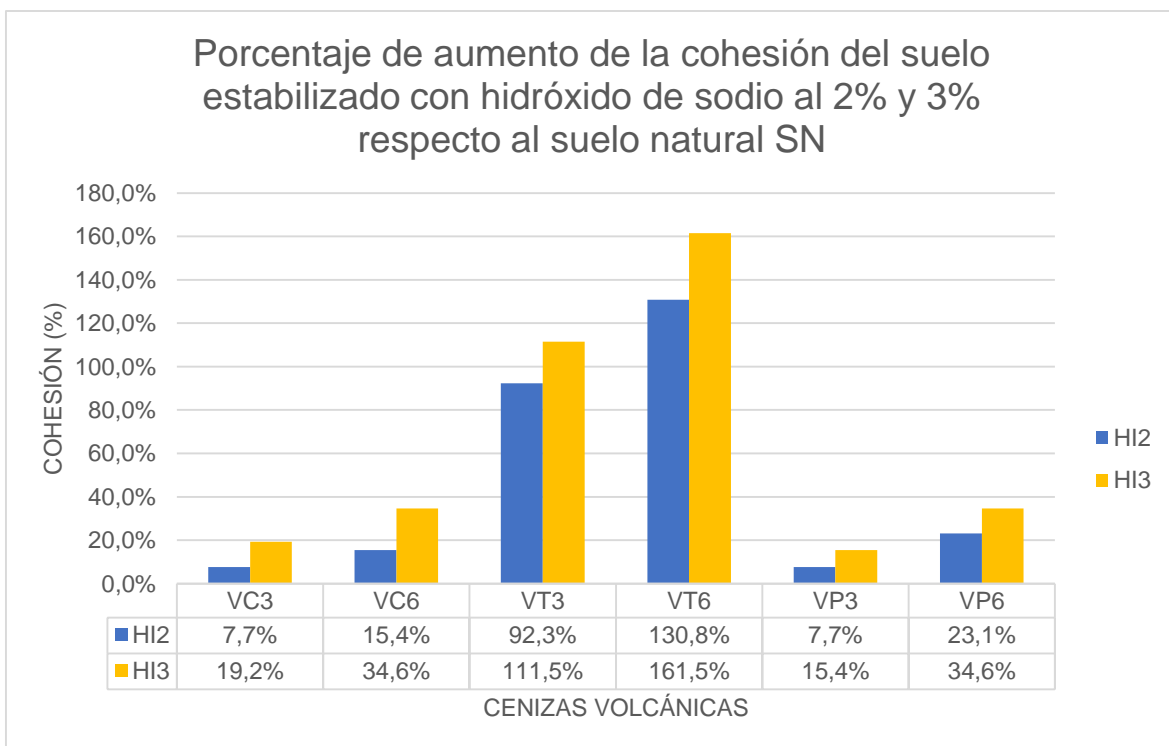


Figura 110. Porcentaje de aumento de la cohesión del suelo estabilizado con hidróxido de sodio al 2% y 3% con respecto al suelo natural SN
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

El ángulo de fricción en las muestras estabilizadas con hidróxido de sodio presenta un mejoramiento de este valor en todos los especímenes, siendo la de mayor resultado aquella con 3% de ceniza volcánica del Guagua Pichincha y 2% de activador (VP3-Hi2), ver Figura 111. Es interesante mencionar que esta propiedad mecánica del suelo se ve afectada de manera inversa con el porcentaje añadido de ceniza y activador, ya que la puzolana al ser material fino modifica la estructura interna del suelo, disminuyendo la fricción que generan las partículas gruesas.

En la Figura 112 se evidencia que las dosificaciones con 2% de activador son las que presentan el mayor incremento del ángulo de fricción, cuyo aumento relevante se da en el suelo estabilizado con 3% de ceniza del volcán Guagua Pichincha, alcanzando casi el 45% en comparación al suelo natural.

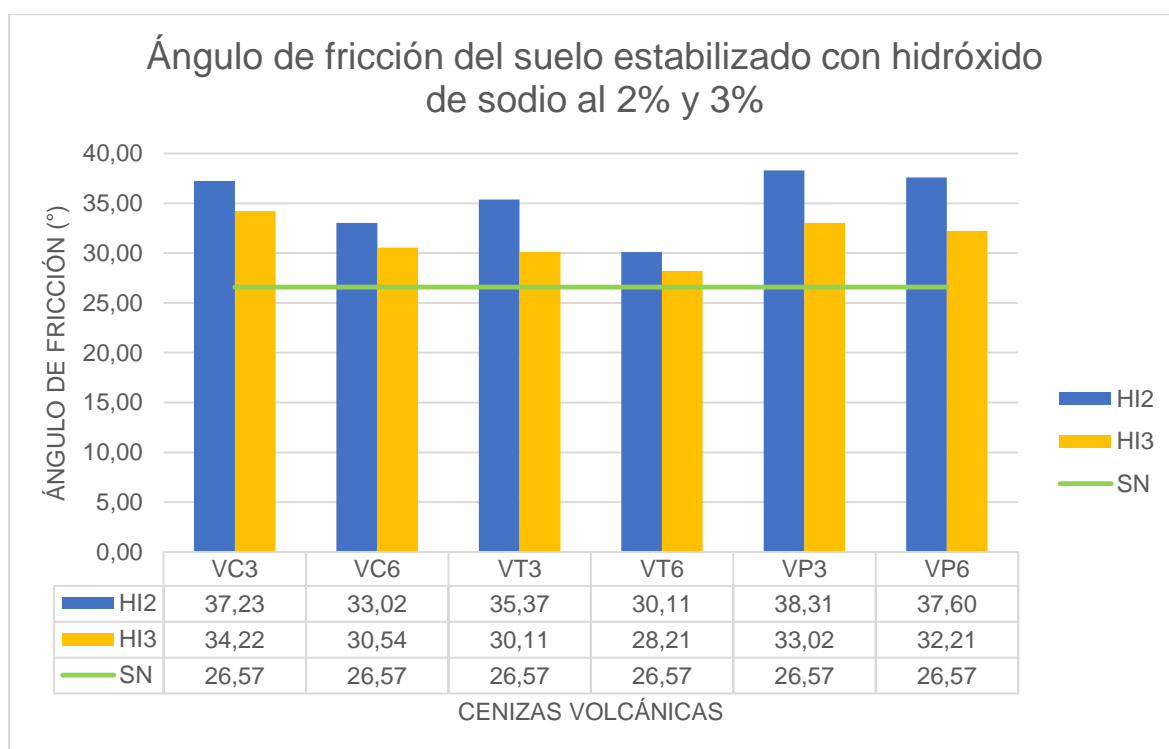


Figura 111. Ángulo de fricción del suelo estabilizado con hidróxido de sodio al 2% y 3%.

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

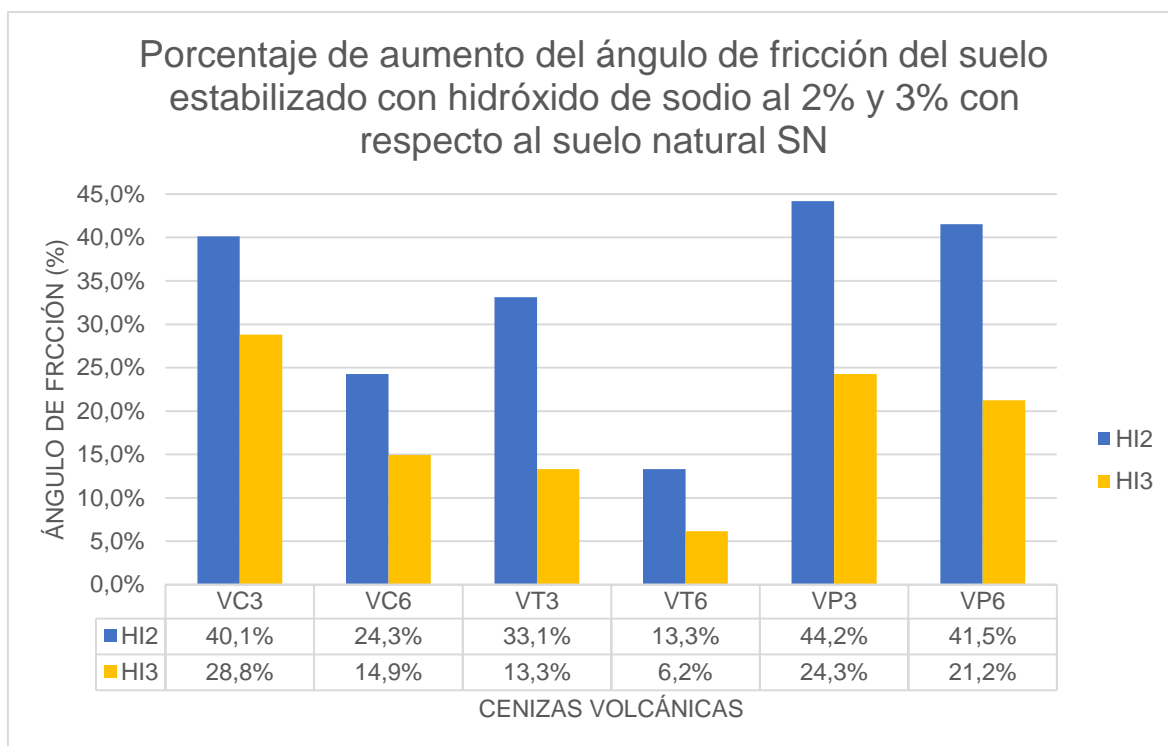


Figura 112. Porcentaje de aumento del ángulo de fricción del suelo estabilizado con hidróxido de sodio al 2% y 3% con respecto al suelo natural.

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

A continuación, se presenta una comparación entre los resultados relevantes obtenidos en el ensayo de corte directo para todas las muestras estabilizadas.

En las Tablas 57, 58 y 59 se presenta la resistencia al corte directo de cada estabilización obtenida a partir de los parámetros de cohesión y ángulo de fricción, junto con el uso de la Ecuación 9. Se considera para el análisis un esfuerzo normal de 2.0 kg/cm^2 , ya que fue la mayor carga aplicada al momento de realizar el ensayo.

Tabla 57

Resistencia al corte directo y sus parámetros para cada muestra estabilizada con ceniza volcánica y cemento como activador

CORTE DIRECTO EN SUELOS			
ASTM D3080			
CEMENTO			
MUESTRA	COHESIÓN (kg/cm²)	ÁNGULO DE FRICCIÓN (°)	RESISTENCIA AL CORTE DIRECTO (kg/cm²)
SN	0,26	26,57	1,26
SN-Ce2	0,45	28,81	1,55
VC3-Ce2	0,30	34,99	1,70
VC6-Ce2	0,35	33,02	1,65
VT3-Ce2	0,49	36,87	1,99
VT6-Ce2	0,63	34,61	2,01
VP3-Ce2	0,37	41,99	2,17
VP6-Ce2	1,25	33,62	2,58
SN-Ce3	0,50	27,47	1,54
VC3-Ce3	0,35	33,02	1,65
VC6-Ce3	0,42	30,96	1,62
VT3-Ce3	1,45	30,96	2,65
VT6-Ce3	1,60	29,25	2,72
VP3-Ce3	1,10	39,69	2,76
VP6-Ce3	1,36	32,21	2,62

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Tabla 58

Resistencia al corte directo y sus parámetros para cada muestra estabilizada con ceniza volcánica y cal como activador

CORTE DIRECTO EN SUELOS			
ASTM D3080			
CAL			
MUESTRA	COHESIÓN (kg/cm²)	ÁNGULO DE FRICCIÓN (°)	RESISTENCIA AL CORTE DIRECTO (kg/cm²)
SN	0,26	26,57	1,26
SN-Ca2	0,50	33,02	1,80
VC3-Ca2	1,35	40,36	3,05
VC6-Ca2	1,50	30,11	2,66
VT3-Ca2	1,10	41,35	2,86
VT6-Ca2	1,21	39,69	2,87
VP3-Ca2	0,82	43,53	2,72
VP6-Ca2	0,90	33,82	2,24
SN-Ca3	1,80	32,62	3,08
VC3-Ca3	1,50	38,66	3,10
VC6-Ca3	1,61	29,25	2,73
VT3-Ca3	1,72	39,69	3,38
VT6-Ca3	1,80	36,87	3,30
VP3-Ca3	1,25	42,30	3,07
VP6-Ca3	1,60	31,80	2,84

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Tabla 59

Resistencia al corte directo y sus parámetros para cada muestra estabilizada con ceniza volcánica e hidróxido de sodio como activador

CORTE DIRECTO EN SUELOS			
ASTM D3080			
HIDRÓXIDO DE SODIO			
MUESTRA	COHESIÓN (kg/cm ²)	ÁNGULO DE FRICCIÓN (°)	RESISTENCIA AL CORTE DIRECTO (kg/cm ²)
SN	0,26	26,57	1,26
VC3-Hi2	0,28	37,23	1,80
VC6-Hi2	0,30	33,02	1,60
VT3-Hi2	0,50	35,37	1,92
VT6-Hi2	0,60	30,11	1,76
VP3-Hi2	0,28	38,31	1,86
VP6-Hi2	0,32	37,60	1,86
VC3-Hi3	0,31	34,22	1,67
VC6-Hi3	0,35	30,54	1,53
VT3-Hi3	0,55	30,11	1,71
VT6-Hi3	0,68	28,21	1,75
VP3-Hi3	0,30	33,02	1,60
VP6-Hi3	0,35	32,21	1,61

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Analizando los mayores valores de resistencia al corte directo en las dosificaciones en las que interviene la cal; para el volcán Cotopaxi, la muestra VC3-Ca3 alcanza un valor de 3.10 kg/cm², correspondiente a una cohesión de 1.50 kg/cm² y ángulo de fricción de 38.66°; en el caso del volcán Tungurahua, la muestra VT3-Ca3 dio la mejor resistencia a corte directo, siendo de 3.38 kg/cm² con una cohesión de 1.72 kg/cm² y ángulo de fricción de 39.69°; y en el volcán Guagua Pichincha, con la muestra VP3-Ca3, presentando una resistencia a corte directo de 3.07 kg/cm² con una cohesión de 1.25 kg/cm² y ángulo de fricción de 42.30°.

En el caso del cemento, para el volcán Cotopaxi, la resistencia al corte de la muestra VC3-Ce2, alcanza un valor de 1.70 kg/cm² correspondiente a una cohesión de 0.30 kg/cm² y ángulo de fricción de 34.99°; en el caso del volcán Tungurahua, la muestra VT6-Ce3 dio la mejor resistencia a corte directo, siendo de 2.72 kg/cm² con una cohesión de 1.60 kg/cm² y ángulo de fricción de 29.25°; y el volcán Guagua Pichincha, con la muestra VP3-Ce3, presentando una resistencia cortante de 2.76 kg/cm² con una cohesión de 1.10 kg/cm² y ángulo de fricción de 39.69°.

Con el hidróxido de sodio, para el volcán Cotopaxi, la resistencia al corte de la muestra VC3-Hi2, alcanza un valor de 1.80 kg/cm² correspondiente a una cohesión de 0.28 kg/cm² y ángulo de fricción de 37.23°; en el caso del volcán Tungurahua, la muestra VT3-Hi2 dio la mejor resistencia cortante, siendo de 1.92 kg/cm² con una cohesión de 0.50 kg/cm² y ángulo de fricción de 35.37°; y el volcán Guagua Pichincha, con la muestra VP3-Hi2, presentando una resistencia al corte de 1.86 kg/cm² con una cohesión de 0.28 kg/cm² y ángulo de fricción de 38.31°.

Los resultados explicados previamente se muestran en la Tabla 60.

Tabla 60

Resistencias cortantes mayores para cada volcán y activador.

MUESTRA	RESISTENCIA AL CORTE (kg/cm ²)	COHESIÓN (kg/cm ²)	ÁNGULO DE FRICCIÓN (°)
VC3-Ca3	3,10	1,50	38,66
VT3-Ca3	3,38	1,72	39,69
VP3-Ca3	3,07	1,25	42,30
VC3-Ce2	1,70	0,30	34,99
VT6-Ce3	2,72	1,60	29,25
VP3-Ce3	2,76	1,10	39,69
VC3-Hi2	1,80	0,28	37,23
VT3-Hi2	1,92	0,50	35,37
VP3-Hi2	1,86	0,28	38,31

Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

Finalmente, se evidencia que las dosificaciones con mejores resultados de cohesión son aquellas con puzolana del volcán Tungurahua para los tres activadores considerados en este estudio; mientras que para el ángulo de fricción, la puzolana óptima fue del volcán Guagua Pichincha.

Es posible determinar que la adición de puzolana junto con un estabilizante ayuda a mejorar la resistencia al corte, puesto que esta mezcla cambia las propiedades mecánicas del suelo (cohesión y ángulo de fricción), modificando la fricción interna de las partículas e incrementando la fuerza que existe entre ellas, haciendo que el suelo empiece a comportarse como un cementante.

4.2.4. TERMOGRAVIMETRÍA

En la Figura 113 se aprecia el comportamiento térmico de las puzolanas resultante de los ensayos de termogravimetría. Se observa que la ceniza del volcán Tungurahua es aquella con la menor pérdida de masa, siendo de 0.15%; mientras que la muestra del volcán Cotopaxi alcanzó un valor de 2.48%.

De igual manera, se contemplan tres zonas de relevancia en las curvas TGA, el primer proceso endotérmico generado por debajo de los 200°C se atribuye a la evaporación de agua; en el rango entre los 200°C y 600°C, se produce la descomposición de estructuras OH, y finalmente sobre los 600°C, la disminución de masa es irrelevante, por lo cual se considera que la muestra se vuelve no reactiva sobre dicha temperatura.

Cabe mencionar que en la termogravimetría de la ceniza del volcán Tungurahua se observa que a partir de los 600°C empieza un proceso donde aumenta la masa; esto puede deberse a la atmosfera en la cual se realizó el ensayo (nitrógeno), generándose reacciones internas entre los componentes de la puzolana y el gas usado. Al ser un porcentaje muy bajo, de casi 0.6%, se lo considera imperceptible.

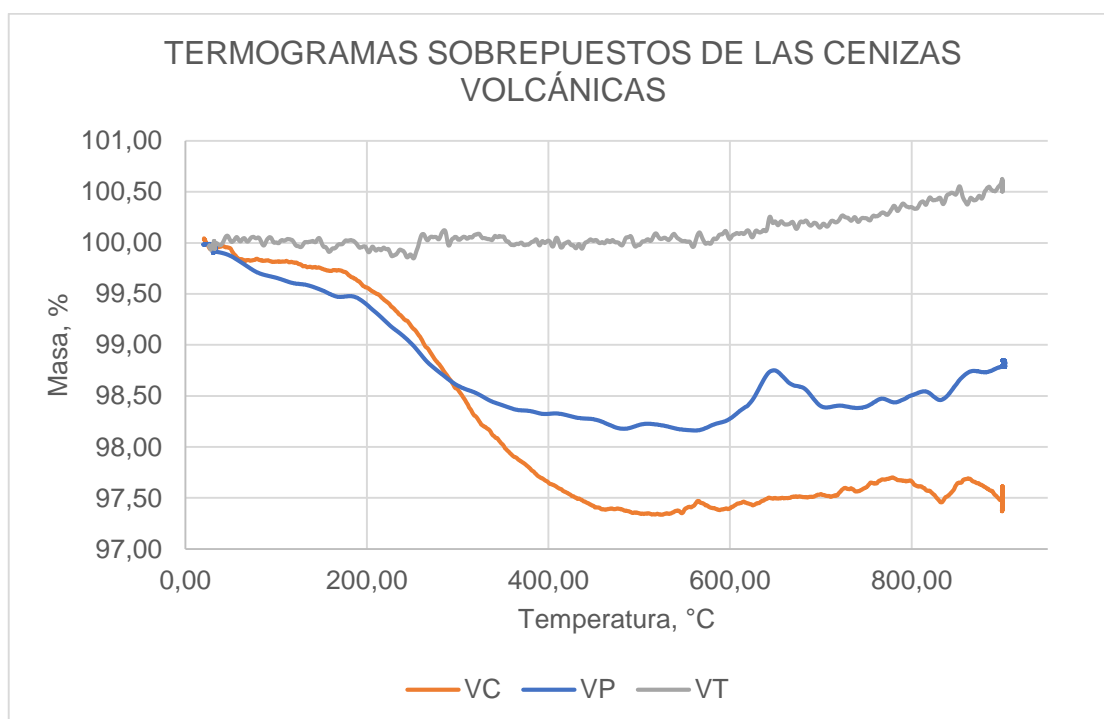


Figura 113. Curvas de termogravimetría superpuestas de las cenizas volcánicas
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

En la Figura 114 se evidencia que las muestras patrón con cal presentan las mayores cantidades de silicatos de calcio hidratados, portlandita y calcita entre las cuatro dosificaciones, resultando en mayores pérdidas de masa.

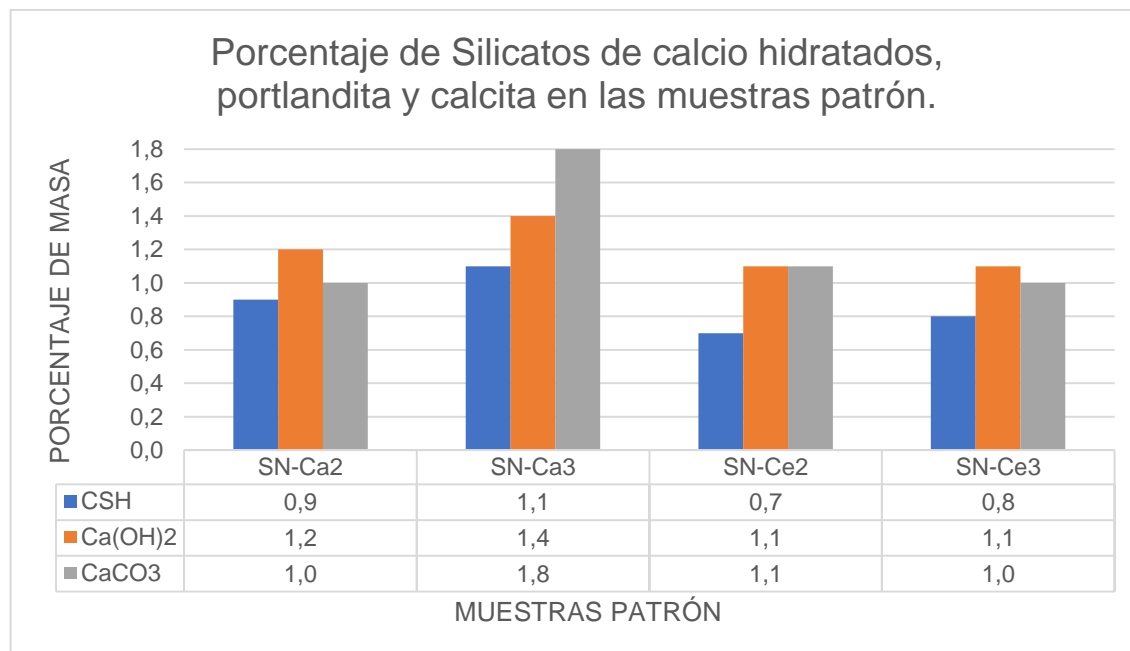


Figura 114. Porcentajes de pérdida de masa de los compuestos por termogravimetría en las muestras patrón
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

En la Figura 115 se aprecia como las muestras con cemento presentan menor pérdida de calcita, además que ambas muestras (SN-Ce2 y SN-Ce3) tienen una derivada similar, lo que se puede apreciar de igual manera con los porcentajes de masa de la Figura 114. Aproximadamente, los puntos de temperatura donde existe la descomposición de cada elemento son de 100°C, 450°C y 700°C, para los Silicatos de calcio hidratados, portlandita y calcita, respectivamente.

Se observa una tendencia a incrementar los compuestos de CSH y CaCO₃ cuando se tiene mayor porcentaje de cal, mientras que la portlandita no varía considerablemente.

Curvas de la derivada de termogravimetría de las muestras patrón

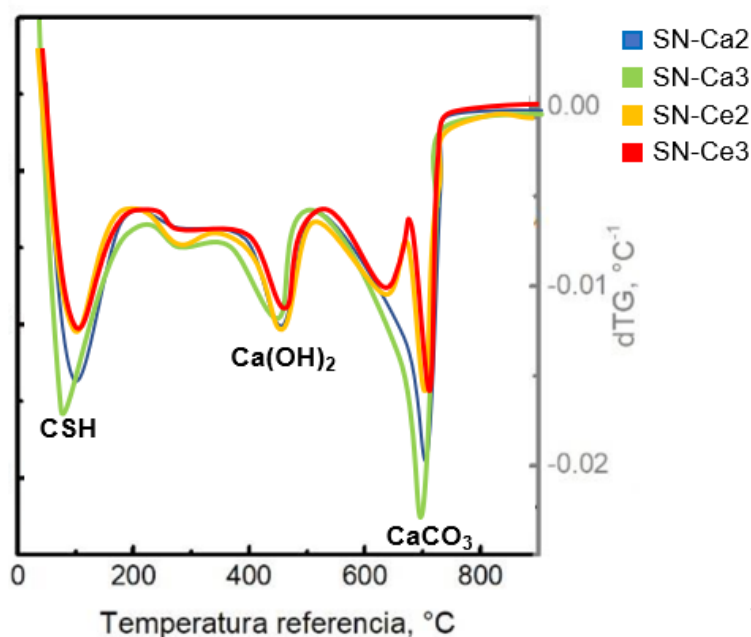


Figura 115. Derivadas de curva de termogravimetría de muestras patrón sobrepuestas (SN-Ce2, SN-Ce3, SN-Ca2 y SN-Ca3)
Elaborado por: (Llumigusin & Pallango, 2022)

4.2.5. DIFRACCIÓN POR RAYOS X

Las cenizas volcánicas presentan alto contenido de aluminatos y silicatos, los cuales son importantes, puesto que generan la reacción del agua junto con el óxido de calcio, lo que deriva a una alta relación puzolánica. Si bien la ceniza del volcán Tungurahua presenta los mayores valores de aluminosilicatos, la ceniza del volcán Cotopaxi es aquella considerada como la de mejores características puzolánicas, ya que su relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ se encuentra dentro del rango propuesto por Lemouagna et al. (2014), y el porcentaje de aluminosilicatos ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$) es mayor a 60%, valor sugerido por Tchakoute et al. (2013).

En el caso de las muestras patrón, se identifica la presencia de grupo plagioclasas, moscovitas y cordierita, la primera en mayor cantidad para el suelo estabilizado con cemento; para el caso de la cal, también se encuentra la calcita (CaCO_3) en porcentajes de 2% y 3% para las estabilizaciones SN-Ca2 y SN-Ca3, respectivamente. Los minerales de Moscovita y Corderita incrementan cuando se usa 3% de cal.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Se evidenció que el suelo de consistencia blanda se vio mejorado con la adición de cenizas provenientes de los volcanes Cotopaxi, Tungurahua y Guagua Pichincha en mezclas con porcentajes de 3% y 6%, junto con los activadores puzolánicos: cal, cemento e hidróxido de sodio en proporciones de 2% y 3%. Propiedades mecánicas tales como, la compresión simple y resistencia al corte directo, tuvieron un incremento en comparación al suelo natural y a sus respectivas muestras patrón; mientras que, en el caso de la densidad seca máxima y humedad óptima, se vieron afectadas de forma no definida según su dosificación.

En el ensayo de compactación Proctor estándar la densidad seca máxima se vio poco influenciada con la adición de la puzolana y el activador, teniendo una elevación en esta propiedad física entre 0.5% y 8.0%. Este efecto se debe a que el suelo estabilizado presenta menor cantidad de vacíos de aire, puesto que éstos son ocupados por el material fino usado para el mejoramiento, y modificando también la cantidad de agua requerida para que las partículas puedan reacomodarse con mayor facilidad.

Con respecto al ensayo de compresión simple, se observó que el suelo estabilizado presenta un comportamiento de tipo cementante, donde el tiempo de curado tiene gran influencia en el incremento del esfuerzo a compresión máximo, generándose una curva de endurecimiento ya que todas las muestras que cumplieron los 56 días de edad mejoraron esta propiedad mecánica, en comparación a los 28 días de curado. De igual manera, la cantidad de activador y puzolana contribuye al aumento de la resistencia a compresión simple en todas las estabilizaciones.

Analizando los resultados de los ensayos de compresión simple (ver Tabla 56), se pudo observar que aquellas muestras estabilizadas con 3% de cal (VC6-Ca3, VT3-Ca3 y VP3-Ca3), tuvieron los mayores valores de resistencia a compresión última de cada ceniza volcánica, además que los porcentajes de aumento respecto

a las muestras patrón y suelo natural verificaron que el uso de la cal fue el óptimo frente a los otros dos activadores (cemento e hidróxido de sodio).

El uso de las puzolanas junto con los activadores tuvo una influencia positiva tanto en la cohesión como en el ángulo de fricción, con respecto al suelo natural, generando una mejor resistencia al corte, siendo un factor importante al momento de estabilizar un suelo. Se constató que la cohesión tuvo una tendencia al incremento conforme aumenta la dosificación con ceniza y activador, en todos los casos; mientras que para el ángulo de fricción ocurrió lo contrario.

En el ensayo de corte directo se determinó que la cal al reaccionar con las puzolanas y el suelo tuvo un mejor efecto en la resistencia al corte en comparación con los otros activadores, siendo las dosificaciones óptimas para cada puzolana las muestras VC3-Ca3, VT3-Ca3 y VP3-Ca3 (ver Tabla 60); de las cuales, la ceniza del volcán Tungurahua evidenció el mejor comportamiento.

En consideración con las propiedades mecánicas analizadas, para el volcán Guagua Pichincha la dosificación óptima fue con 3% de puzolana y 3% de cal (VP3-Ca3), reflejando la mayor resistencia tanto para compresión simple como para corte directo, con resultados de 3991.38 kN/m² y 3.07 kg/cm², respectivamente; para el volcán Tungurahua, el espécimen VT3-Ca3 se consideró como la mezcla óptima, puesto que su esfuerzo a compresión simple fue el más satisfactorio, y su resistencia a corte la más elevada, con valores de 3869.23 kN/m² y 3.38 kg/cm², respectivamente; de igual forma para el volcán Cotopaxi, la resistencia a compresión simple entre las mezclas VC3-Ca3 y VC6-Ca3 no presenta una diferencia considerable, con resultados iguales a 4413.34 kN/m² y 4459.04 kN/m², respectivamente, por lo cual se toma la dosificación VC3-Ca3 como la muestra eficaz, ya que, al comparar los valores de resistencia a corte directo, ésta tiene un esfuerzo cortante de 3.10 kg/cm², frente al valor de 2.73 kg/cm² obtenido con el otro porcentaje de puzolana.

Considerando el análisis mineralógico de la termogravimetría y difracción por rayos X de las cenizas volcánicas, se confirmó que las tres tienen silicatos y aluminatos, los cuales permiten considerarlas como puzolanas naturales. Si bien la ceniza del volcán Tungurahua presenta los valores más altos de relación SiO₂/Al₂O₃

y aluminosilicatos ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$), la ceniza volcánica del Cotopaxi obtuvo una relación puzolánica dentro de los intervalos de 3.3 y 4.5 sugeridos para considerarse reactiva; en cuanto a los ensayos mecánicos, esta misma puzolana evidenció mejores resultados, por lo cual se la considera como la óptima entre las tres.

En cuanto a los activadores, las características mineralógicas obtenidas por TGA y DRX evidencia que la cal tiene los mejores resultados al ser mezclada con el suelo, ya que presenta un alto porcentaje de calcita, debido a la carbonatación ocurrida a los 700°C del ensayo de termogravimetría, además de la portlandita, la cual está en un orden del 1.4% cuando se usa el 3% con suelo; por otro lado se observa la presencia de silicatos de calcio hidratados (CSH) en las cuatro muestras patrón, los cuales se generan durante el proceso de hidratación de la mezcla y aportan en la resistencia al suelo estabilizado, encontrándose en mayor porcentaje en la muestra SN-Ca3. Por lo tanto, la adición de un 3% de cal en el suelo tiene los mejores efectos en cuanto a su mineralogía en comparación con las otras dosificaciones.

Por lo mencionado previamente, entre las tres cenizas estudiadas en esta investigación, la del volcán Cotopaxi presentó una estabilización eficiente, con porcentaje de 3% en peso respecto al peso del suelo en humedad óptima; mientras que la cal, obtuvo los resultados superiores como activador puzolánico con 3% de adición al suelo en humedad óptima, evidenciando así, un desarrollo de las características mecánicas del suelo, haciéndolo más estable. Es importante mencionar que el hidróxido de sodio expuso mejoras poco significativas en los ensayos mecánicos, por lo que su aplicación junto con cenizas resulta ineficiente entre las tres opciones de activación alcalina.

5.2. RECOMENDACIONES

Para el remoldeo del suelo estabilizado con puzolana, se debe tener precaución al momento de extraer la muestra, por lo que se recomienda engrasar el molde y así evitar fisuras o rupturas del espécimen.

Verificar la densidad seca de las muestras en cada remoldeo para los ensayos de corte directo y compresión simple, de manera que se mantenga en al menos 95% del resultado obtenido por la prueba de Proctor estándar.

Al momento de trabajar con hidróxido de sodio (NaOH), se debe usar equipos de protección personal adecuados, ya que esta sustancia química es sumamente corrosiva y su contacto directo puede causar daños a la piel. Su almacenamiento debe ser en un lugar a temperatura ambiente dentro de un recipiente correctamente sellado y etiquetado.

Para el proceso de curado es importante almacenar las muestras en un espacio exclusivo, como por ejemplo una cámara de curado, donde no se tengan cambios bruscos de temperatura ni contacto directo con el sol, evitando así pérdidas de humedad. Cada muestra debe estar debidamente rotulada con su nomenclatura, fecha y peso húmedo.

En el caso de los ensayos de termogravimetría y difracción de rayos X, es necesario que las muestras sean tratadas mediante un proceso de secado, molienda y cribado por el tamiz #200, ésto con el fin de obtener un material homogéneo tanto en consistencia como en tamaño de partículas, para que los resultados sean satisfactorios.

Se recomienda amplificar el estudio de estabilización de suelos con ceniza del volcán Cotopaxi, enfocada en otras propiedades físicas y mecánicas, tales como límites de Atterberg, permeabilidad, consolidación, etc., de manera que se pueda corroborar la eficacia de la dosificación propuesta.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdullah, A., Jaafar, M. S., Taufiq-Yap, Y. H., Alhozaimy, A., Al-Negheimish, A., & Noorzai, J. (2012). The effect of various chemical activators on pozzolanic reactivity: A review. *Scientific Research and Essays*, 7(7), 719–729.
<https://doi.org/10.5897/SRE10.858>
- Acuña, K. (2017). *Análisis de las cenizas del Tungurahua (granulométrico, de componentes y químico) en la primera fase eruptiva de 2010 (enero-marzo)* [Escuela Politécnica Nacional].
<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18819>
- Afrin, H. (2017). A Review on Different Types Soil Stabilization Techniques. *Habiba Afrin. A Review on Different Types Soil Stabilization Techniques. International Journal of Transportation Engineering and Technology*, 3(2), 19–24. <https://doi.org/10.11648/j.ijtet.20170302.12>
- Almeida, E., & Ramón, P. (1991). *Las Erupciones Históricas del Volcán Tungurahua* (1st ed., Vol. 2). https://www.researchgate.net/profile/Patricio-Ramon/publication/299416679_Las_erupciones_historicas_del_volcan_Tungurahua/links/57ed36a008aea5476b45ed97/Las-erupciones-historicas-del-volcan-Tungurahua.pdf
- Andrade, D., Hall, M., Mothes, P., Troncoso Salgado, L. P., Eissen, J.-P., Samaniego, P., Egred, J., Ramón, P., Rivero, D., & Yepes, H. (2005). Los peligros volcánicos asociados con el Cotopaxi. *Los Peligros Volcánicos En Ecuador*, 3, 147.
- Aparicio, M., & Carbajar, G. (2010). Utilidad de la difracción de rayos x en las nanociencias. *SciELO*, 3(2).
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-56912010000200062
- ATSRD. (2002, April). *Hidróxido de sodio (Sodium Hydroxide)*. División de Toxicología ToxFAQsTM.
https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts178.html

- Barberi, F., Ghigliotti, M., Macedonio, G., Orellana, H., Pareschi, M. T., & Rosi, M. (1992). Volcanic hazard assessment of Guagua Pichincha (Ecuador) based on past behaviour and numerical models. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 49(1–2), 53–68. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(92\)90004-W](https://doi.org/10.1016/0377-0273(92)90004-W)
- Berhane, H.-G. (2006). *Excavations and Foundations in Soft Soils - Hans-Georg Kempfert, Berhane Gebreselassie - Google Libros* (1st ed., Vol. 1). Springer. https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=idlDAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=excavation+and+foundation+in+soft+soils&ots=VLBV3Bp4k7&sig=JfhWOblJkWhteA-t8dH7pNtbGMQ&redir_esc=y#v=onepage&q=excavation%20and%20foundation%20in%20soft%20soils&f=false
- Buitrón, S., & Enríquez, A. (2018). *Estudio de la estabilización de arcillas expansivas de Manabí con ceniza del volcán Tungurahua* [Escuela Politécnica Nacional]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19654>
- Bustillos, J., Le-Pennec, J., Samaniego, P., Eychenne, J., Troncoso, L., Ordóñez, J., & Gonza, T. (2014). Transición del estilo eruptivo durante las erupciones andesíticas en sistema abierto: “Contribución al estudio de los depósitos de ceniza del volcán Tungurahua-2010”. | *Revista Politécnica*. *Revista Politécnica*, 33(1). https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/106
- Das, B. (2011). *Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones* (7th ed., Vol. 1). Cengage Learning.
- Das, B. (2013). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (4th ed., Vol. 1). Cengage Learning. https://www.academia.edu/37854899/Fundamentos_de_Ingenieria_Geotecnic_a_Braja_M_Das
- Djobo, J. N. Y., Elimbi, A., Tchakouté, H. K., & Kumar, S. (2016). Volcanic ash-based geopolymer cements/concretes: the current state of the art and

- perspectives. *Environmental Science and Pollution Research* 2016 24:5, 24(5), 4433–4446. <https://doi.org/10.1007/S11356-016-8230-8>
- Djobo, Y. J. N., Elimbi, A., Dika Manga, J., & Djon Li Ndjock, I. B. (2016). Partial replacement of volcanic ash by bauxite and calcined oyster shell in the synthesis of volcanic ash-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 113, 673–681. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.03.104>
- Djon Li Ndjock, B. I., Elimbi, A., & Cyr, M. (2017). Rational utilization of volcanic ashes based on factors affecting their alkaline activation. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 463, 31–39. <https://doi.org/10.1016/J.JNONCRY SOL.2017.02.024>
- Firoozi, A. A., Guney Olgun, C., Firoozi, A. A., & Baghini, M. S. (2017). Fundamentals of soil stabilization. *International Journal of Geo-Engineering*, 8(1), 1–16. <https://doi.org/10.1186/S40703-017-0064-9/FIGURES/3>
- Florez, C., Caicedo, Z., Zárate, R., & Contreras, B. (2008). Estabilización química de suelos expansivos de San José de Cúcuta (Colombia) usando cenizas volantes. *Dialnet*, 13(2), 19–31. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5461214>
- Francisca, F. M. (2010). Comportamiento de limos loessicos contaminados con hidrocarburos estabilizados y solidificados con cemento Portland. *Boletín Geológico y Minero*, 121(2), 131–138.
- Francou, B., Cáceres, B., Ramírez, J., Eissen, J.-P., Taupin, J.-D., Jordan, E., Ungerechts, L., Maisincho, L., Barba, D., Cadier, E., Bucher, R., Peñafiel, A., Samaniego, P., & Mothes, P. (2005). *Determinacion del volumen del casquete de hielo del volcan Cotopaxi*. <https://www.researchgate.net/publication/282171461>
- Guzmán, E. (2009). *Estabilización de un suelo dispersivo mediante zeolita micronizada* [Instituto Superior Politécnico “José A. Echeverría”]. https://www.researchgate.net/figure/Comportamiento-de-los-iones-de-Sodio-y-Calcio-adheridos-a-las-particulas-de-arcilla-24_fig1_283425330

- Hall, M. L., & Mothes, P. A. (1994). Tefroestratigrafía holocénica de los Volcanes Principales del Valle interandino, Ecuador. *El Contexto Geologico Del Espacio Físico Ecuatoriano : Neotectónica, Geodinámica, Volcanismo, Cuencas Sedimentarias, Riesgo Sísmico*, 6(1), 47–67.
- Hall, M. L., Robin, C., Beate, B., Mothes, P., & Monzier, M. (1999). Tungurahua Volcano, Ecuador: structure, eruptive history and hazards. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 91(1), 1–21.
[https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(99\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(99)00047-5)
- Hall, M., & Mothes, P. (2007). The rhyolitic–andesitic eruptive history of Cotopaxi volcano, Ecuador. *Bulletin of Volcanology 2007 70:6*, 70(6), 675–702.
<https://doi.org/10.1007/S00445-007-0161-2>
- Herrero, E. (2005). La cal hoy: fabricación, tipos de cal, especificaciones de calidad, normas y criterios de conformidad - Dialnet. *Cemento Hórmigon*, 1(874), 10–19. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1126399>
- Hidalgo, S. (2018). *Evaluación de la reactividad puzolánica de la ceniza de paja de arroz* [Universidad Politécnica de Valencia].
<https://riunet.upv.es/handle/10251/105638>
- HOLCIM. (2021, July 27). *Holcim launches ECOPlanet global range of green cement*. <https://www.holcim.com/media/media-releases/ecoplanet-green-cement-launch>
- Ilić, B., Radonjanin, V., Malešev, M., Zdujčić, M., & Mitrović, A. (2016). Effects of mechanical and thermal activation on pozzolanic activity of kaolin containing mica. *Applied Clay Science*, 123, 173–181.
<https://doi.org/10.1016/J.CLAY.2016.01.029>
- Instituto Geofísico - EPN. (2018, April 16). *Volcán Guagua Pichincha: Revisión de Evidencias de Flujos Incandescentes en el Sector Occidental (ERUPCIONES PASADAS)*. <https://www.igepep.edu.ec/interactuamos-con-usted/1571-volcan-guagua-pichincha-revision-de-evidencias-de-flujos-incandescentes-en-el-sector-occidental>

- Instituto Geofísico EPN. (2015). *Actualización de la Actividad Eruptiva--Volcán Cotopaxi N°16 . 1*. <https://www.igeppn.edu.ec/servicios/noticias/1176-actualizacion-de-la-actividad-eruptiva-volcan-cotopaxi-n-16>
- Lemougna, P. N., Chinje Melo, U. F., Delplancke, M. P., & Rahier, H. (2014). Influence of the chemical and mineralogical composition on the reactivity of volcanic ashes during alkali activation. *Ceramics International*, *40*(1), 811–820. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2013.06.072>
- Lemougna, P. N., MacKenzie, K. J. D., & Melo, U. F. C. (2011). Synthesis and thermal properties of inorganic polymers (geopolymers) for structural and refractory applications from volcanic ash. *Ceramics International*, *37*(8), 3011–3018. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2011.05.002>
- Lemougna, P. N., Wang, K. tuo, Tang, Q., Nzeukou, A. N., Billong, N., Melo, U. C., & Cui, X. min. (2018). Review on the use of volcanic ashes for engineering applications. *Resources, Conservation and Recycling*, *137*, 177–190. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2018.05.031>
- Leonelli, C., Kamseu, E., Boccaccini, D. N., Melo, U. C., Rizzuti, A., Billong, N., & Misselli, P. (2013). Volcanic ash as alternative raw materials for traditional vitrified ceramic products. [Http://Dx.Doi.Org/10.1179/174367607X159329](http://Dx.Doi.Org/10.1179/174367607X159329), *106*(3), 135–141. <https://doi.org/10.1179/174367607X159329>
- Licuy, C., & Román, K. (2020). Estudio de la estabilización de arcillas expansivas utilizando el 10, 20 y 30% en peso, de puzolanas de ceniza del volcán Tungurahua y ceniza de la cascarilla de arroz en composiciones iguales [Escuela Politécnica Nacional]. In 2020. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20630>
- Manosalvas, S. (2014a, June 3). *Observatorio del Volcán Tungurahua*. <https://www.igeppn.edu.ec/ovt>
- Manosalvas, S. (2014b, June 24). *Guagua Pichincha - Instituto Geofísico - EPN*. <https://www.igeppn.edu.ec/guagua-pichincha/content/11-guagua-pichincha>
- Manosalvas, S. (2014c, June 24). *Tungurahua - Instituto Geofísico - EPN*. <https://www.igeppn.edu.ec/tungurahua/content/18-tungurahua>

- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2003). *GUÍAS PARA MANEJO SEGURO Y GESTIÓN AMBIENTAL DE 25 SUSTANCIAS QUÍMICAS* (1st ed., Vol. 1).
- Moreta, D. (2018). “Análisis de riesgo en el cantón Riobamba, frente a lahares y flujos de lodo asociados al volcán Chimborazo” [Pontificia Universidad Católica]. <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/14813>
- Murmu, A. L., Jain, A., & Patel, A. (2019). Mechanical Properties of Alkali Activated Fly Ash Geopolymer Stabilized Expansive Clay. *KSCE Journal of Civil Engineering* 2019 23:9, 23(9), 3875–3888. <https://doi.org/10.1007/S12205-019-2251-Z>
- NTE INEN 152. (2010). Cemento Portland. Requisitos. *NORMA TÉCNICA ECUATORIANA*, 4.
- Ordóñez, J., Hall, M. L., & Samaniego, P. (2011). Erupciones volcánicas del Pleistoceno tardío alrededor de Ambato : caracterización y distribución de sus depósitos. *Memorias de las 7mas Jornadas En Ciencias de La Tierra*.
- Pavón, F., & Contreras, D. (2021). Zonificación de la amenaza por dispersión y caída de ceniza del volcán Guagua Pichincha, Ecuador. *Investigaciones Geográficas*, 105. <https://doi.org/10.14350/RIG.60315>
- Penneq, J. (2018). Diez mil años de convivencia entre comunidades y volcanes en la sierra del Ecuador. *Curiosidades Científicas*, 20.
- Penneq, J.-L. le, Samaniego, P., Eissen, J.-P., Hall, M. L., Monzier, M., Mothes, P., Ramón, P., Robin, C., Molina, I., Yepes, H., & Egred, J. (2005). Los peligros volcánicos asociados con el Tungurahua. *Los Peligros Volcánicos Asociados Con El Tungurahua*, 1–123. <https://doi.org/10.4000/BOOKS.IRDEDITIONS.18041>
- Perez, N., Perez, A., & Garnica, P. (2019). EVALUACION DEL OXIDO DE CALCIO (ESTABILICAL) COMO ESTABILIZADOR DE SUELOS. In *Publicación Técnica* (1st ed., Vol. 560, pp. 3–4). Instituto Mexicano del Transporte. <https://trid.trb.org/view/1640690>

- PerkinElmer. (n.d.). *Simultaneous Thermal Analyzer (STA) 8000*. Retrieved May 11, 2022, from <https://www.perkinelmer.com/product/sta-8000-lab-system-n5370027>
- Porta, J., López-Acevedo, M., & Roquero, C. (2003). Edafología para la agricultura y el medio ambiente. In Ediciones Mundi-Prensa (Ed.), *P839e 7352 c.1* (3rd ed.). Mundi-Prensa.
<https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/14463>
- Puertas, F., Martínez-Ramírez, S., Alonso, S., & Vázquez, T. (2000). Alkali-activated fly ash/slag cements: Strength behaviour and hydration products. *Cement and Concrete Research*, *30*(10), 1625–1632.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00298-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00298-2)
- Robin, C., Samaniego, P., le Penec, J. L., Mothes, P., & van der Plicht, J. (2008). Late Holocene phases of dome growth and Plinian activity at Guagua Pichincha volcano (Ecuador). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *176*(1), 7–15.
<https://doi.org/10.1016/J.JVOLGEORES.2007.10.008>
- Rodriguez, E., & Villegas, E. (2012). Caracterización de polímeros aplicando el método termogravimétrico. *Métodos y Materiales*, *2*(1), 25–32.
<https://doi.org/10.15517/MYM.V2I1.13470>
- Samaniego, P., Eissen, J.-P., Hall, M. L., Monzier, M., Mothes, P., Ramón, P., Robin, C., Molina, I., & Yepes, H. (2003). Los peligros volcánicos asociados con el Cotopaxi. In *Los peligros volcánicos asociados con el Cotopaxi*.
<https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.18041>
- Sánchez, E., Mejía, F., Vizcaino, G., & Cipriani-Ávila, I. (2018). Análisis mineralógico y multielemental de la ceniza volcánica, producto de la erupción del Cotopaxi en 2015, por difracción de rayos X (XRD) y espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) y sus posibles aplicaciones e impactos. *InfoANALITICA*, *6*(1), 9–23.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7113386>

- Sanjuán Barbudo, M. A., & Chinchón Yepes, Servando. (2004). *Introducción a la fabricación y normalización del cemento Portland*. (1st ed., Vol. 1). Universidad d'Alacant.
- Serra, M. F., Conconi, M. S., Suarez, G., Aglietti, E. F., & Rendtorff, N. M. (2015). Volcanic ash as flux in clay based triaxial ceramic materials, effect of the firing temperature in phases and mechanical properties. *Ceramics International*, 41(5), 6169–6177. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2014.12.123>
- Shi, C. (2001). An overview on the activation of reactivity of natural pozzolans. *Canada Journal of Civil Engineering*, 28(5), 778–786. <https://doi.org/10.1139/L01-041>
- Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2007). Principios de análisis instrumental . In C. Learning (Ed.), *Journal of Chemical Information and Modeling* (6th ed., Vol. 53, Issue 9). Learning Cengage. https://www.academia.edu/37326567/Principios_de_an%C3%A1lisis_instrumental_6ta_Edici%C3%B3n_Douglas_A_Skoog_LIBROSVIRTUAL
- Syahril, S., Somantri, A. K., & Haziri, A. A. (2020). Study of stabilized soil clay soil characteristics using vulcanic ash and tailing as subgrade layers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 830(2), 22–43. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/830/2/022043>
- Tchakoute, H. K., Elimbi, A., Yanne, E., & Djangang, C. N. (2013). Utilization of volcanic ashes for the production of geopolymers cured at ambient temperature. *Cement and Concrete Composites*, 38, 75–81. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2013.03.010>
- Telenchana, E., Córdova, M., Mothes, P., Cuesta, R., Espín, P., Samaniego, P., & Bernard, B. (2019). The New Volcanic Hazard Map of Guagua Pichincha Volcano. *Instituto Geofísico EPN*, 3, 24–48. https://www.researchgate.net/profile/Pedro-Espin-Bedon/publication/336104232_The_New_Volcanic_Hazard_Map_of_Guagua_Pichincha_Volcano_Third_Edition_2019/links/5d94b2f0299bf10cff226ad2/The-New-Volcanic-Hazard-Map-of-Guagua-Pichincha-Volcano-Third-Edition-2019.pdf

- Torres-Carrasco, M., & Puertas, F. (2017). La activación alcalina de diferentes aluminosilicatos como una alternativa al Cemento Portland: cementos activados alcalinamente o geopolímeros. *Revista Ingeniería de Construcción*, 32(2), 05–12. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732017000200001>
- Valdivieso, J. (2012). *Diseño del Proceso de Elaboración de Empaste para Interiores y Exteriores con el Uso de Polvo de Cal y Resina* [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/2034>
- Vallejo, K. (2019). *Caracterización y distribución de las cenizas holocenas, en el tramo del corredor “Metro de Quito”* [Escuela Politécnica Nacional].
<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20104>
- Vu, D. H., Wang, K. S., Nam, B. X., Bac, B. H., & Chu, T. C. (2011). Preparation of humidity-controlling porous ceramics from volcanic ash and waste glass. *Ceramics International*, 37(7), 2845–2853.
<https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2011.04.118>

ANEXOS