



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

Tema

**Reforzamiento de Terraplenes de Arcillas Expansivas con Material Reciclado
Pulverizado de Escombros Producidos por Terremotos**

Autor

Almeida Zambrano Iván Andrés

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de

INGENIERO CIVIL

Tutor

Ing. Martínez Rehpani Colón Gilberto, Msc.

Guayaquil, Ecuador

9 de febrero del 2024



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN


Certificamos que el presente Trabajo de Titulación fue realizado en su totalidad por **Almeida Zambrano Iván Andrés**, como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR

f. 

ING. MARTÍNEZ REHPANI COLÓN GILBERTO, MSC.

DIRECTORA DE LA CARRERA

f. 

ING. STEFANY ALCÍVAR BASTIDAS, MSC.

Guayaquil, a los 9 días del mes de febrero del año 2024



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Almeida Zambrano Iván Andrés

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación, de **Reforzamiento de terraplenes de arcillas expansivas con material reciclado pulverizado de escombros producidos por terremotos** previo a la obtención del título de **Ingeniero civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 9 días del mes de febrero del año 2024

EL AUTOR

f.

Almeida Zambrano Iván Andrés



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL


AUTORIZACIÓN

Yo, **Almeida Zambrano Iván Andrés**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Reforzamiento de terraplenes de arcillas expansivas con material reciclado pulverizado de escombros producidos por terremotos**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 9 días del mes de febrero del año 2024

EL AUTOR:

f. 

Almeida Zambrano Iván Andrés

ALMEIDA_IVÁN TRABAJO DE TITULO

7%
Textos sospechosos



7% Similitudes
0% similitudes entre comillas
2% entre las fuentes mencionadas
< 1% Idiomas no reconocidos

Nombre del documento: ALMEIDA_IVÁN TRABAJO DE TITULO.docx
ID del documento: 3577510ca5ee5059e5d71b9252935af444dc0c23
Tamaño del documento original: 33,08 MB

Depositante: Clara Catalina Glas Cevallos
Fecha de depósito: 16/2/2024
Tipo de carga: interface
fecha de fin de análisis: 16/2/2024

Número de palabras: 21.909
Número de caracteres: 149.632



Fuentes principales detectadas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	TESIS.docx tesis #4a7e08 El documento proviene de mi grupo	2%		Palabras idénticas: 2% (371 palabras)
2	vsiip.info Plantilla de Examen Complexivo - VSIP.INFO 23 fuentes similares https://vsiip.info/plantilla-de-examen-complexivo-pdf-free.html	1%		Palabras idénticas: 1% (311 palabras)
3	repositorio.ucsug.edu.ec #478441 El documento proviene de mi grupo	<1%		Palabras idénticas: <1% (26 palabras)
4	repositorio.ucsug.edu.ec Giuliana Santos_AVANCE #478441 El documento proviene de mi grupo	<1%		Palabras idénticas: <1% (26 palabras)
5	repositorio.ucsug.edu.ec http://repositorio.ucsug.edu.ec/bitstream/3317/11242/3/T-UCSG-PRE-ING-IC-88.pdf.txt	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (148 palabras)
6	repositorio.uta.edu.ec https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/23637/1/Tesis 1036 - Salazar Vaca María Victori...	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (37 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	Documento de otro usuario #81e9a0 El documento proviene de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (29 palabras)
2	www.bbc.com Las razones por las que colapsaron tantos edificios en Ciudad de ... https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-41481250 https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers11-11/010051351.pdf	≤ 1%		Palabras idénticas: ≤ 1% (34 palabras)
3	repositorio.uta.edu.ec https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/23637/1/Tesis 1036 - Salazar Vaca María Victori...	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (37 palabras)
4	Documento de otro usuario #3ca4f9 El documento proviene de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (25 palabras)
5	Documento de otro usuario #3ca4f9 El documento proviene de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (25 palabras)

Fuentes mencionadas (sin similitudes detectadas) Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

- 1 <https://n9.cl/s8d5qx>
- 2 <https://www.eldiario.ec/noticias-manabi-ecuador/508474-laderas-quedan-sin-proteccion/>
- 3 <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/76781/taludes.pdf>
- 4 <https://n9.cl/hnem7>
- 5 <https://wellpoint.es/perforacion-a-rotacion-y-recuperacion-de-testigo/>

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mis padres, Iván Almeida y María del Carmen Zambrano, por su incansable apoyo y esfuerzo, porque a lo largo de mi vida me han inculcado valores indispensables para mi desarrollo y, sobre todo, por enseñarme siempre con el ejemplo, por ser una guía en momentos difíciles y nunca dudar de mis capacidades. Sin ellos, este logro no sería posible,

Agradezco a mi hermano, José Alberto, por su apoyo en este trabajo, el que me fue de gran ayuda en momentos complicados que se presentaron durante este proceso. A mi amigo y tutor de tesis, Ing. Gilberto Martínez, quien, con su dedicación, esfuerzo y confianza depositada en mí, aportó en gran manera mi desarrollo tanto personal como profesionalmente, y el del presente trabajo investigativo.

A mis compañeros y amigos de la universidad, quienes juntos atravesamos momentos desafiantes en el proceso y así mismo, buenos que hicieron de esta carrera una gran experiencia en mi vida.

Para finalizar, agradezco a Geocimientos, por parte del Ing. Francisco Grau, por permitirme realizar las pruebas de laboratorio necesarias en sus instalaciones.

Iván Andrés Almeida Zambrano




UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA INGENIERÍA CIVIL

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. 

ING. FEDERICO VON BUCHWALD DE JANON, PH.D.

DECANO

f. 

ING. ALEXANDRA CAMACHO MONAR, PH.D.

COORDINADOR DEL ÁREA O DOCENTE DE LA CARRERA

f. 

ING. STEFANY ALCÍVAR BASTIDAS, MSC.

Oponente

ÍNDICE

RESUMEN.....	XVI
ABSTRACT.....	XVII
Antecedentes	2
Planteamiento del problema.....	5
Alcance de la investigación.....	12
Objetivos de la investigación	13
Objetivo General	13
Objetivos Específicos.....	13
1.1 Producción de desperdicios en el campo de la construcción	15
1.1.1 Botaderos de escombros de materiales de demolición	17
1.1.2 Desafíos Ambientales de los botaderos	17
1.1.3 Oportunidades para la Gestión Sostenible	18
1.1.4 Nidos o enjambres sísmicos	18
1.1.5 Enjambres sísmicos en Manabí	19
1.1.6 Sismos históricos en el Ecuador	20
1.1.7 Colapso de edificaciones	23
1.1.8 Arcillas expansivas	24
1.1.8.1 Desafíos en la Ingeniería Civil	24
1.1.9 Daños en terraplenes por arcillas expansivas	25
1.1.10 Trituración de rocas con pata de cabra	26
1.1.11 Uso de rastra para homogenizar	27
1.1.12 Uso de rotavator para pulverizar.....	28
1.1.12.1 Uso del Rotavator para Pulverizar Suelos	28
1.1.13 ODS y Sustentabilidad.....	30
1.1.14 Análisis granulométrico de suelo.....	32
1.1.15 Límites de Atterberg	33
1.1.16 Índice de plasticidad	34
1.1.17 Ensayo de compactación Proctor.....	35
1.1.18 Ensayo de CBR.....	36
2.1 Deslizamientos de terraplenes construidos con arcillas expansivas	39

2.2	Características y propiedades de las arcillas expansivas	40
2.2.1	Génesis de las arcillas expansivas	42
2.3	Deslizamiento de terraplenes	44
2.3.1	Mecanismos y causas de deslizamientos en terraplenes.....	45
2.3.2	Factores geotécnicos que afectan la estabilidad de terraplenes	48
2.3.3	Ausencia de protección de terraplenes y taludes en carreteras.....	49
2.3.4	Revestimiento vegetal para prevenir deslizamientos en terraplenes.....	50
2.3.5	Métodos de análisis de estabilidad de terraplenes	52
2.3.6	Métodos de muestreo de suelos para evaluar la expansividad de las arcillas.....	54
2.4	Especificaciones técnicas para la construcción de terraplenes según el manual del MTOP.....	56
2.4.1	Generalidades	56
2.4.2	Colocación	58
2.4.3	Principios de diseño para terraplenes en áreas con arcillas expansivas.....	59
2.5	Tecnologías y soluciones innovadoras	60
2.5.1	Desarrollos tecnológicos para prevenir o mitigar deslizamientos en terraplenes.....	61
2.5.1.1	Sistemas de Instrumentación Geotécnica Avanzada	61
2.6	Sostenibilidad en los vertederos de desechos de construcción.....	71
2.6.1	Impacto Ambiental y Reducción de Emisiones.....	72
2.6.2	Claves para la gestión de residuos en la construcción sostenible.....	73
2.6.3	Elaboración de un estudio de gestión de residuos de construcción y demolición.....	74
3.1	Muestreo de campo	76
3.2	Muestreo de escombros de demolición	80
3.3	Mezcla 70 % arcilla y 30 % desechos de construcción triturados	84
3.4	Resultados del análisis de laboratorio	89
3.4.1	Granulometría, límites de Atterberg y CBR de la arcilla expansiva.....	89
3.4.1.1	Granulometría	89
3.4.1.2	Límites de Atterberg	90
3.4.1.3	CBR de arcillas expansivas Ensayo de compactación Proctor.....	90
3.4.2	Ensayos de granulometría, límites de Atterberg y CBR de la mezcla	92
3.4.2.1	Granulometría	92
3.4.3	Límites de Atterberg	92
3.4.4	CBR de la mezcla.....	93
3.5	Proceso constructivo para la ejecución de la trituración, molido y mezclado del material	

3.6	Análisis de los resultados obtenidos	104
	DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN	115

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Vía destruida por fuertes lluvias invernales en Jama, Manabí	2
Figura 2. Formaciones geológicas presentes en el área de estudio	3
Figura 3. Marco geodinámico de Ecuador	4
Figura 4. Suelo agrietado debido a la contracción del suelo posterior a la expansión por absorción de humedad.	5
Figura 5. Deslave de gran magnitud producto de las lluvias en la zona en la vía Chone-Flavio Alfaro.	6
Figura 6. Colapso del espaldón de la calzada y cuneta en vía El Carmen – Sto. Domingo.....	7
Figura 7. Desplazamiento y asentamiento de espaldón y cuneta.	8
Figura 8. Deslizamiento en vía Tosagua - Bahía de Caráquez	8
Figura 9. Deslizamiento en vía Tosagua - Bahía de Caráquez	9
Figura 10. Colapso de estructuras después del sismo del 2016 en Manabí.	10
Figura 11. Escombrera "La Solita" recibiendo escombros del sismo de Manabí	11
Figura 12. Listado de escombreras de Manabí.....	11
Figura 13. Mapa de las escombreras de Manabí.....	12
Figura 14. Residuos de obras civiles y demolición.....	15
Figura 15. Residuos de varios materiales de construcción.....	16
Figura 16. Botadero El Tambo - Perú.....	17
Figura 17. Ubicación de los sismos (círculos) localizados.	19
Figura 18. Terremoto del 5 de agosto de 1949.....	20
Figura 19. El terremoto y el tsunami de esmeraldas en 1906.	21
Figura 20. Sismo Pedernales 2016.....	22
Figura 21. Mapa de aceleraciones producidas en el sismo del 16 de abril de 2016.....	22
Figura 22. Colapso de edificios en Ciudad de México.	23
Figura 23. Rodillo pata de cabra	27

Figura 24. Rastra agrícola	28
Figura 25. Sicma RD rotavator 210CM	30
Figura 26. Materiales para el ensayo de granulometría.....	33
Figura 27. Gráfica de plasticidad SUCS	34
Figura 28. Materiales para el ensayo de compactación Proctor.....	36
Figura 29. Esquema de máquina para ensayos de CBR.....	37
Figura 30. Máquina Automática para Ensayos de CBR	38
Figura 31. Zona arcillosa susceptible a deslizamientos.....	40
Figura 32. Afectación de las estructuras debido a la expansión lateral de las arcillas.....	41
Figura 33. Mecanismo de expansión es la absorción de agua por ósmosis.	42
Figura 34. Proceso de formación geomorfológica de las arcillas.	43
Figura 35. Proceso de formación de los suelos.	44
Figura 36. Deslizamiento del terraplén de la vía en la Provincia de Manabí.....	45
Figura 37. Demostración gráfica de la saturación del suelo. Poros, espacio aéreo y agua del suelo en situaciones de saturación, capacidad de campo y seco.	46
Figura 38. Fallo del terraplén de la carretera durante el terremoto M 5.0.....	47
Figura 39. Cortes y rellenos en terraplenes.	48
Figura 40. Talud sin la correcta protección en la ciudad de Manta, Manabí.	50
Figura 41. Control de erosión del suelo con cobertura vegetal.....	51
Figura 42. Aportación de estabilidad y estética de la cobertura vegetal al terraplén.....	52
Figura 43. Sección de cálculo de un talud por el método de equilibrio límite.....	53
Figura 44. Muestras alteradas obtenidas de sondeo a rotación mediante batería simple.	55
Figura 45. Muestras inalteradas, obteniendo la estructura y humedad natural del suelo.....	55
Figura 46. Prueba de perforación a rotación y recuperación de testigos.....	56
Figura 47. Terraplén escalonado.	57
Figura 48. Especificaciones de materiales en diseño de terraplén.	59

Figura 49. Extensómetro de Varilla de Puntos Múltiples utilizados para medir los movimientos del suelo.	62
Figura 50. Monitoreo de la presión del agua en el suelo a través del piezómetro.....	62
Figura 51. Geotextil sobre terraplén para el control de la erosión.	63
Figura 52. Geotextil Tejido diseñado y fabricado con una estructura única que le permite ser utilizado para reforzar, separar y drenar.....	64
Figura 53. Red de drenaje superficial.....	64
Figura 54. Implementación de sistemas subterráneos de drenaje.	65
Figura 55. Utilización de cal para estabilizar suelos arcillosos.....	67
Figura 56. Muro de contención de tierras.	68
Figura 57. Residuos de demolición de vertederos no sostenible.....	69
Figura 58. Reciclaje de residuos de construcción y demolición aplicando medidas de reciclaje y sostenibilidad.....	71
Figura 59. Gestión de desperdicios y reciclaje de materiales de demolición.....	72
Figura 60. Talud con presencia de arcillas expansivos.	73
Figura 61. Talud de carretera con arcillas expansivas.	75
Figura 62. Textura esponjosa y partículas muy finas del material.....	77
Figura 63. Extracción del material para análisis en laboratorio.	77
Figura 64. Extracción del material para análisis en laboratorio.	78
Figura 65. Residuos de materiales de construcción siendo triturados inicialmente.....	79
Figura 66. Residuos de materiales de construcción.	80
Figura 67. Residuos de materiales de construcción siendo demolidos por un rodillo liso.	81
Figura 68. Tambor del rodillo liso triturando material de demolición.....	82
Figura 69. Material de residuos de construcción demolido.	82
Figura 70. Muestra de arcilla expansiva siendo colocada en horno.....	83
Figura 71. Arcillas expansivas en horno para eliminar la humedad en sus partículas.....	84
Figura 72. Secado de arcillas expansivas durante 24 horas.	85

Figura 73. Arcillas expansivas siendo tendidas para su secado.	86
Figura 74. Muestra del material de escombros triturado.	86
Figura 75. Proceso de mezcla 70 % arcilla 30 % escombros triturados.	87
Figura 76. Mezcla 70% arcilla 30% escombros triturados.	88
Figura 77. Tamizado de material de arcillas expansivas por el tamiz 40.	88
Figura 78. Análisis granulométrico de las arcillas expansivas.	89
Figura 79. Resultados índices de plasticidad de las arcillas expansivas	89
Figura 80. Clasificación SUCS y AASHTO.	90
Figura 81. Gráfica de Densidad seca vs Humedad de la arcilla.	90
Figura 82. Humedad óptima.	90
Figura 83. Datos del esponjamiento de las arcillas expansivas.	90
Figura 84. Resultados del CBR de las arcillas.	91
Figura 85. Resultado del C.B.R de la arcilla expansiva.	91
Figura 86. Análisis granulométrico del material de demolición.	91
Figura 87. Registro de datos de muestra	91
Figura 88. Resultados índices de plasticidad de la mezcla.	92
Figura 89. Compactación de prueba de Proctor de la mezcla.	92
Figura 90. Proceso de ensayo de compactación.	93
Figura 91. Gráfica de densidad seca vs. humedad de la mezcla.	93
Figura 92. Resultados del ensayo de Proctor.	94
Figura 93. Datos del hinchamiento de la mezcla.	94
Figura 94. Resultados del CBR de la mezcla.	95
Figura 95. Resultado CBR de la mezcla.	95
Figura 96. Triturado de material de escombros con excavadora con cuchara trituradora situada en el botadero.	95
Figura 97. Traslado de material de demolición en plaza de trabajo provisional.	95

Figura 98. Proceso de colocación de material de demolición y material deslizado en plaza de trabajo definitiva	96
Figura 99. Tendido del material de la mezcla en plaza de trabajo definitiva con cargadora frontal	97
Figura 100. Uso de la rastra agrícola para elevar el material grueso para ser triturado	98
Figura 101. Triturado de la mezcla con rodillo pata de cabra.....	98
Figura 102. Pulverizado del material con el uso de rotavator	99

RESUMEN

Esta tesis aborda la problemática de los terraplenes construidos sobre suelos arcillosos expansivos, cuyas propiedades pueden generar problemas de estabilidad y deslizamientos. Así, el objetivo principal es investigar y proponer una solución sostenible y económicamente viable mediante el uso de material reciclado de escombros como refuerzo para mejorar las características mecánicas de los terraplenes.

De este modo, se realiza un análisis detallado de las propiedades geotécnicas de las arcillas expansivas y los desafíos asociados con la construcción de terraplenes en estas condiciones, asimismo, se examina la composición y el comportamiento del material reciclado de escombros para evaluar su capacidad como agente de refuerzo para las arcillas expansivas

El trabajo experimental incluye pruebas de laboratorio para caracterizar las propiedades mecánicas y geotécnicas del material reciclado, así como ensayos de compactación y consolidación en mezclas con arcillas expansivas, lo que permite evaluar la mejora en la resistencia, la compresibilidad y la estabilidad del suelo resultante de la adición del material reciclado.

Los resultados obtenidos evidencian mejoras significativas en las propiedades geotécnicas de los terraplenes reforzados con material reciclado. Por ello, se concluye que esta estrategia no solo proporciona una solución técnica efectiva para mitigar los problemas asociados con suelos arcillosos expansivos, sino que contribuye a la sostenibilidad ambiental y la gestión responsable de los residuos de construcción.

Palabras Clave: *terraplenes, arcillas expansivas, escombros, sostenibilidad, reforzamiento, ensayos de laboratorio.*

ABSTRACT

This thesis addresses the issue of embankments constructed on expansive clay soils, whose properties can lead to stability problems and slides. The main objective is to investigate and propose a sustainable and economically viable solution by using recycled debris material as reinforcement to improve the mechanical characteristics of the embankments.

The research involves a detailed analysis of the geotechnical properties of expansive clays and the challenges associated with building embankments under these conditions. The composition and behavior of the recycled debris material are examined to assess its capacity as a reinforcing agent for expansive clays.

The experimental work includes laboratory tests to characterize the mechanical and geotechnical properties of the recycled material, as well as compaction and consolidation tests in mixtures with expansive clays. The improvement in the strength, compressibility, and stability of the soil resulting from the addition of recycled material is evaluated.

The obtained results reveal significant improvements in the geotechnical properties of embankments reinforced with recycled material. It is concluded that this strategy not only provides an effective technical solution to mitigate problems associated with expansive clay soils but also contributes to environmental sustainability and responsible construction waste management.

Keywords: *Embankments, expansive clays, debris, sustainability, reinforcement, laboratory tests.*

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

En el litoral ecuatoriano, particularmente, en la provincia de Manabí, se observan tramos de carretera con asentamientos y deformaciones sugestivas de la existencia de una relación entre las precipitaciones del sitio y los cambios en la geometría de estos terraplenes.



Figura 1. Vía destruida por fuertes lluvias invernales en Jama, Manabí

Nota. Tomado de *En Manabí y El Oro cuantifican los daños por fuerte estación invernal*, por Diario El Universo, 2021, <https://n9.cl/ia6uk>

En este sentido, la cuenca de Manabí se localiza al norte de la zona costera del país, así, es la de mayor tamaño de las cuencas del Ecuador, pues posee alrededor de 250 km. Geológicamente, esta zona está formada por un basamento de rocas cretácicas de la formación Piñón, donde yacen rocas volcánico-terrágenas de la formación Cayo y clásticas neríticas de las formaciones de San Eduardo, Tosagua, Daule, Tablazo, Canoa y sus depósitos cuaternarios (Baldock, 1982).

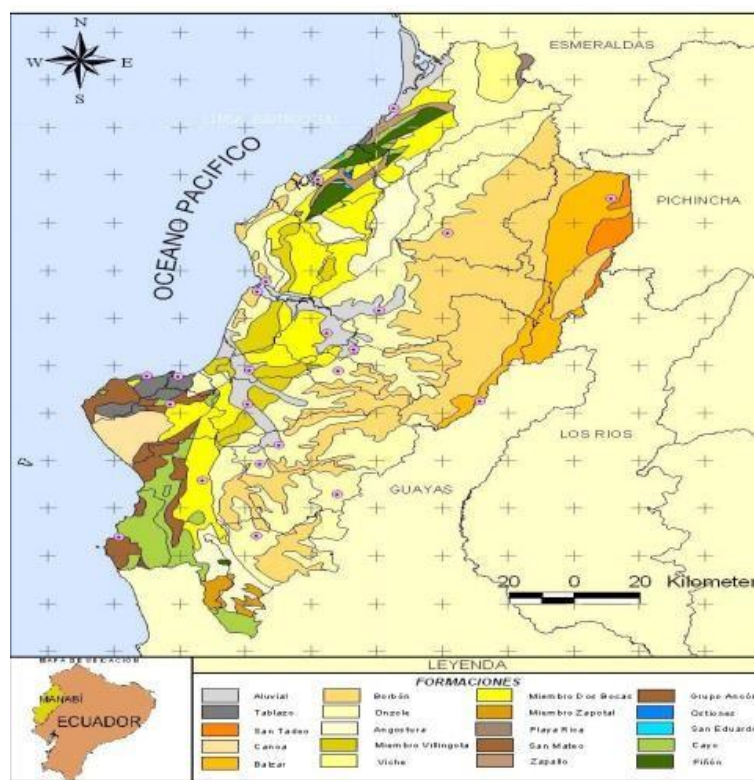


Figura 2. Formaciones geológicas presentes en el área de estudio

Nota. Tomado de *Evaluación ingeniero-geológica del deterioro de las rocas en la provincia de Manabí, Ecuador*, por M. Chávez, 2008, Escuela Politécnica del Litoral.

A nivel regional, las costas de la provincia de Manabí están situadas frente a una región de subducción en actividad, por ello, son áreas altamente propensas a actividad sísmica. Así, la franja costera ubicada en la parte interna de la Fosa Oceánica Ecuatoriana se reconoce como el rasgo oceánico predominante dentro del Sistema de Subducción (Paz y Morante, 2021).

Este sistema constituye una combinación de un arco-fosa, lo que marca el límite entre las placas corticales Nazca y Sudamericana. La placa oceánica de Nazca se desplaza hacia el este y la placa continental Sudamericana se desplaza hacia el oeste, lo que genera una zona de subducción, debido a que la placa oceánica se sumerge por debajo de la placa continental por las diferencias de densidad (Paz y Morante, 2021).

Con base en la topografía de esta región, está ubicada entre el Océano Pacífico y la Cordillera de los Andes, por lo que tiene niveles de elevación pequeños y tierras bajas. A las tierras bajas se les considera con un nivel inferior a 200 m.s.n.m., y la Cordillera de los Andes con un nivel de altitud inferior a los 1 000 m,s,n,m (Buitrón y Enríquez, 2018).

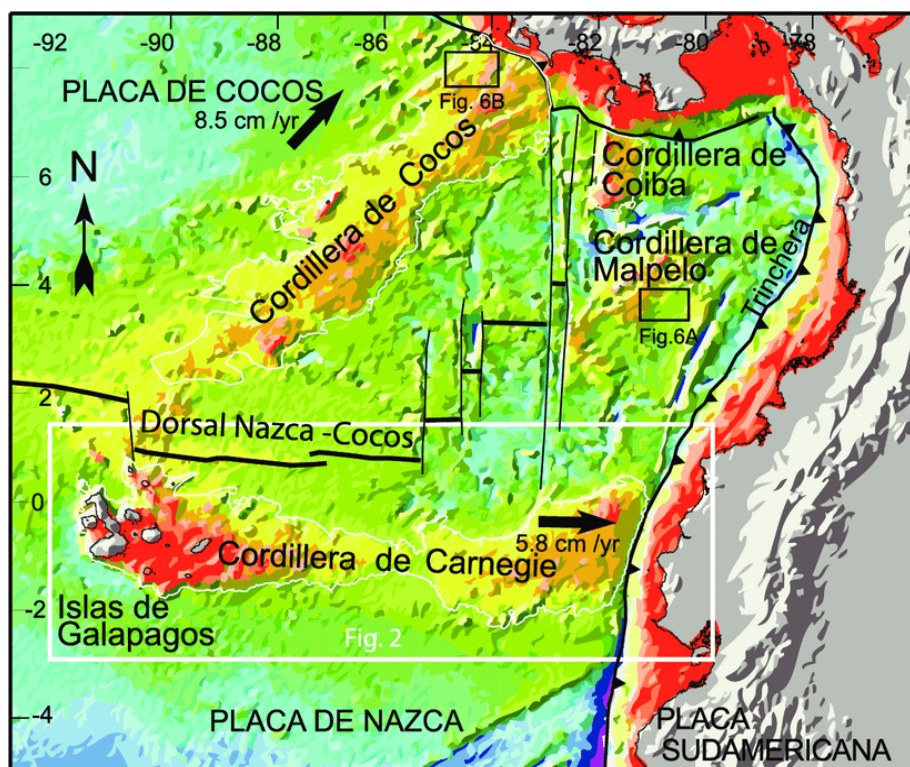


Figura 3. Marco geodinámico de Ecuador

Nota. Tomado de *El karst submarino de mega depresiones circulares de la Cordillera de Carnegie (Ecuador): posible origen por disolución submarina*, por F. Michaud et al., 2009, https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers11-11/010051351.pdf

Actualmente, los suelos colapsables representan un desafío geotécnico clave en diversas partes del mundo, sobre todo, donde existe la presencia de arcillas expansivas, las que desempeñan un rol crucial en el comportamiento de estos suelos. Las arcillas expansivas tienen la capacidad de expandirse al absorber la humedad de su entorno y contraerse luego de la evaporación de la misma, lo que tiene consecuencias críticas para la estabilidad de infraestructuras y construcciones.



Figura 4. Suelo agrietado debido a la contracción del suelo posterior a la expansión por absorción de humedad.

Nota. Tomado de *Arcillas expansivas y suelos expansivos*, por J. Guzmán, 2023, Universidad Complutense de Madrid.

Planteamiento del problema

Situación problemática 1: Terraplenes contruidos sobre arcillas expansivas

En las regiones de Ecuador donde existen depósitos de arcillas expansivas con alto contenido de montmorillonita, se evidencian deformaciones, agrietamientos y fracturas en las estructuras de los terraplenes de las vías construidas con este material al interactuar con las lluvias y los periodos secos, a pesar de estar correctamente compactados. Estos fenómenos generan costos considerables en reparaciones y mantenimientos que conllevan peligro e incomodidad a los usuarios.



Figura 5. Deslave de gran magnitud producto de las lluvias en la zona en la vía Chone-Flavio Alfaro.

Nota. Tomado de *En tiempo récord la Prefectura de Manabí habilitó la vía estatal Chone – Flavio Alfaro – El Carmen*, por Prefectura de Manabí, 2002, <https://n9.cl/acx6w>

Una de las regiones más afectadas es la provincia de Manabí, debido a que sufre constantes daños como deslaves, asentamientos y destrucción del pavimento. De acuerdo con el Diario El Universo (2003), “Manabí sufre el castigo de tener un suelo arcilloso que provoca hundimientos y una geografía accidentada”, lo que ha provocado diversas afectaciones en diferentes tipos de proyectos viales o estructurales. En la Figura 6, se expone una socavación y erosión del material bajo el espaldón de la vía, debido a las intensas lluvias que no han tenido una correcta evacuación a través del sistema de drenaje de la zona.



Figura 6. Colapso del espaldón de la calzada y cuneta en vía El Carmen – Sto. Domingo.

Nota. Tomado de *Fichas técnicas de puntos críticos mpr Manabí*, por Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2014, <https://n9.cl/tm46dx>

Respecto con los inconvenientes más comunes que se presentan por este tipo de suelo, se resaltan los problemas de drenaje en las carreteras, lo que ocasiona que el agua retenida se infiltre en capas inferiores de pavimento, por ende, se reduce su resistencia y provoca asentamientos en la misma (García y Cabana, 2014).

Estos asentamientos diferenciales se prolongan a lo largo de la carretera, lo que da lugar a grandes irregularidades en su superficie, así, se generan áreas que se hunden y otras que se elevan, lo que afecta la calidad del pavimento. En la Figura 7, se observa la erosión de sobreelevación de la mesa de la vía, debido a la humedad del suelo y la falta de drenaje.



Figura 7. Desplazamiento y asentamiento de espaldón y cuneta.

Nota. Tomado de *Fichas técnicas de puntos críticos mpr Manabí*, por Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2014, <https://n9.cl/tm46dx>

En la Figura 8, se aprecia cómo actúan las arcillas expansivas, las que poseen una baja resistencia al corte para el suelo de cimentación de la vía y el cuerpo del terraplén de la misma.



Figura 8. Deslizamiento en vía Tosagua - Bahía de Caráquez.

Nota. Elaboración propia

Este caso evidenciado en la provincia de Manabí es particular, lo que se debe a la forma en la que actúan las arcillas expansivas, así, como se puede apreciar en la Figura 9, estas provocan una expansión y contracción del suelo por su entorno en el que se encuentran varios acuíferos y un clima con temperaturas elevadas, lo que provoca la evaporación de las partículas en expansión, con afectaciones directas en las estructuras a su alrededor.

En este caso, las arcillas expansivas han provocado una socavación bajo la capa del pavimento, por ende, el material asfáltico pierde resistencia por falta de estabilidad dado el deslizamiento de sus capas posteriores, lo que conlleva a la total destrucción de la vía.



Figura 9. Deslizamiento en vía Tosagua - Bahía de Caráquez.

Nota. Elaboración propia

Estas consecuencias representan cantidades económicas considerables para su reparación y molestias para los usuarios que, frecuentemente, hacen uso de estas vías, lo que afecta su seguridad y sus vehículos de transporte.

Situación problemática 2: Material de residuos de construcción acumulado en escombreras

Después del sismo del 16 de abril de 2016, uno de los problemas fue la ubicación de los escombros. Las principales fuentes de generación de desechos fueron las viviendas, lo que pasó a convertirse en un problema urbano complejo, por ello, es necesario reciclar estos materiales que pueden ser recuperados si se considera su impacto hacia el medio ambiente.



Figura 10. Colapso de estructuras después del sismo del 2016 en Manabí.

Nota. Tomado de *El sismo registrado en Guayas tiene similitudes con el terremoto del 16 de abril del 2016*, por El Expreso, 2022, <https://suscripcion.expreso.ec/id/login?loginwall=true>

Hasta la presente fecha, ha sido casi imposible establecer un programa eficiente de reciclaje de los restos de paredes, techos y demás, debido a que estos residuos de construcciones terminaron mezclados. En este sentido, el terremoto obligó a las autoridades a enviar directamente todos estos materiales a distintas escombreras, como las ubicadas en Portoviejo, Manta, Sucre-Bahía, Rocafuerte, Pedernales, Jaramijó, Montecristi, Bolívar-Calceta y Jama (Diario El Comercio, 2016).

Actualmente, estas escombreras almacenan los desechos de las construcciones y vías que colapsaron, por lo que algunas escombreras llegaron a su capacidad máxima, debido a la poca cabida instalada inicial que poseían y la posterior llegada de escombros de las construcciones desplomadas que fueron trasladados después del terremoto del 2016. Estas escombreras fueron adaptadas de manera improvisada y sin cumplir con los requisitos mínimos exigidos en la normativa actual para tratamiento y gestión de desechos.



Figura 11. Escombrera "La Solita" recibiendo escombros del sismo de Manabí

Nota. Tomado de *Escombrera de La Solita ya ha sido ocupada en un 35 por ciento*, por El Diario Ecuador, 2016, <https://n9.cl/isv45>

La Figura 12 expone el listado de escombreras operativas durante el sismo del 16 de abril del 2016, lo que indica su capacidad y volumen a disponer. Durante este tiempo de emergencia, las escombreras trabajaron al máximo de su capacidad, pues se vivió una seria problemática al no poder acumular más material desalojado.

LISTADO DE ESCOMBRERAS EN LA PROVINCIA DE MANABÍ					
CANTÓN	UBICACIÓN	DISTANCIA DE LA POBLACIÓN	CAPACIDAD	ESTADO	VOLUMEN A DISPONERSE
Portoviejo	Vía a Portoviejo- Manta, sector La Solita	1,5 Km	150.000	OPERATIVA	450.000
	MTOP Picoaza	3,5 Km	150.000	COMPLEMENTARIA	
Manta	Vía a San Mateo	3 Km	150.000 m3 hasta 300.000m3	OPERATIVA	
Pedernales 184.000 (Miduvi)	Vía a Pedernales-Jama	5 Km	100.000 m3	OPERATIVA	
	Vía a La Concordia	Pendiente	80.000 m3	NO OPERATIVAS	
	Vía a Cojimles	Pendiente	80.000 m3	NO OPERATIVAS	
Chone	en actual botadero			OPERATIVA	Se está disponiendo en terrenos valdíos de ciudadelas 30 de marzo, ciudadela esmeraldas, vía a la parroquia boyaca
Jama	Sector Río Antigua Tamarindos		500000	OPERATIVA	
	rio antiguo Sector Filomena				
Rocafuerte	Y de Rocafuerte, sector Crucita.		80000	OPERATIVA	
Montecristi	Al costado del cementerio de Montecristi (terreno municipal)	1Km	700000	OPERATIVA	
San Vicente	Botadero Municipal			OPERATIVA	poco material generado y totalmente desalojado

Figura 12. Listado de escombreras de Manabí.

Nota. Tomado de *Informe de situación No. 55*, por Secretaría de Gestión de Riesgos, 2016, <https://n9.cl/miobd>

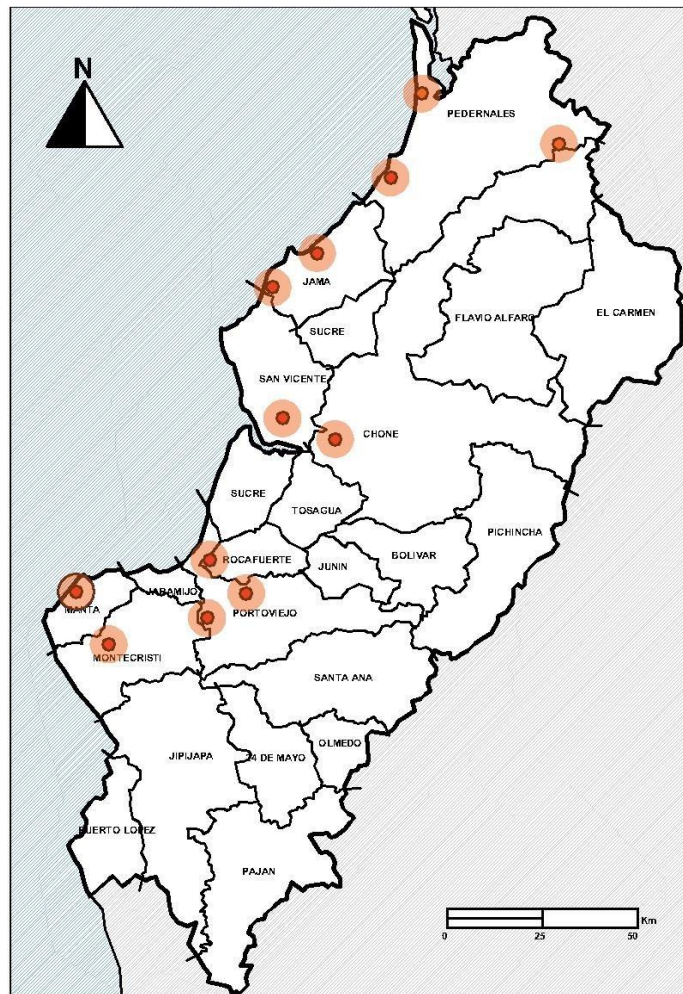


Figura 13. Mapa de las escombreras de Manabí.

Nota. Elaboración propia

La práctica de aprovechar materiales e insumos de construcción ha sido constante a lo largo del tiempo, pese a ello, son escasos los expertos o entidades del sector de la construcción que adoptan un enfoque ecológico al buscar materiales provenientes de demoliciones para su reutilización en distintos proyectos de infraestructura. Esta estrategia no solo promueve un comportamiento más amigable con el medio ambiente, sino que genera beneficios significativos en términos de eficiencia y ahorro para los constructores y los inversionistas involucrados en la actividad.

Alcance de la investigación

Esta investigación se centró en comprender y brindar una propuesta para solucionar los mecanismos que provocan el colapso de los suelos bajo la influencia de arcillas expansivas, así como desarrollar estrategias efectivas para mitigar y prevenir los riesgos asociados.

Así, en este análisis se exploraron las principales características de los suelos colapsables, con énfasis en cómo las propiedades de las arcillas expansivas pueden llevar a la compresión del suelo, asimismo, se proporcionó un enfoque práctico y teórico para detectar, de manera temprana, suelos propensos al colapso y generar una alternativa efectiva para solucionar este fenómeno. Es preciso considerar la importancia de la ampliación de estos conocimientos que no han sido profundizados en la formación de pregrado de la carrera de ingeniería civil, pues es una común problemática en los entornos del país, como el tratamiento de arcillas expansivas, por ello, este método es innovador, sustentable y de bajo costo.

El presente estudio realizó diferentes pruebas de porcentajes para la dosificación entre el material de escombros pulverizado y un suelo con presencia de arcillas expansivas, con el propósito de obtener el porcentaje ideal para el mejoramiento de la resistencia del suelo indicado y verificar el comportamiento de las propiedades mecánicas de la interacción de las arcillas expansivas con el material reciclado. Así, en la provincia de Manabí, existe mayor presencia de este tipo de suelo y mayores riesgos de colapso, debido a que la población hace uso del mismo para la construcción y en ocurrencia de sismos.

Objetivos de la investigación

Objetivo General

Establecer los criterios para el tratamiento económico de las arcillas expansivas de Manabí que fueron utilizadas en la construcción del cuerpo de los terraplenes de carreteras y, mediante la utilización de una mezcla con el material reciclado y molido de los escombros producidos por el terremoto de abril de 2016, evitar deformaciones, grietas y hundimientos durante las temporadas lluviosas.

Objetivos Específicos

Fase 1.- Analizar, globalmente, tres investigaciones relacionadas con el uso de materiales de construcción producto de demoliciones, los que fueron aprovechados con éxito en mezclas con productos arcillosos.

Fase 2.- Definir, con ensayos de caracterización, granulometría y CBR realizados en laboratorio, el porcentaje óptimo para el mezclado de escombros reciclados molidos de los botaderos existentes por el terremoto de abril del 2016, en muestras obtenidas de un terraplén real construido con arcillas expansivas, donde se justifique el incremento de la capacidad de soporte de los terraplenes y la sensible reducción de sus deformaciones.

Fase 3.- Sistematizar esquemáticamente en una propuesta innovativa y gráfica el proceso constructivo para la ejecución de: a) la trituración y molido económico de los escombros producidos por el terremoto de abril de 2016, sin la utilización de una trituradora convencional, a partir del uso de un rodillo pata de cabra vibratorio y una rastra agrícola, y b) el sistema de mezclado económico con este material reciclado y pulverizado de los botaderos, para reducir el potencial de expansión de las arcillas de los terraplenes, sin el uso de una central de mezclado, a partir del empleo de un rotovator agrícola.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

1.1 Producción de desperdicios en el campo de la construcción

En los primeros tres meses del año, el campo de la construcción experimentó su mayor aumento durante ese lapso desde el 2011, con un crecimiento del 17,45 %. Este desempeño lideró el crecimiento entre los diversos sectores que contribuyen al Producto Interno Bruto (PIB) (Diario El Universo, 2014)

Una problemática eminente en este sector es la cantidad de desechos generados en cuanto a construcción, pues las malas administraciones y fallos en los cálculos de material hacen que cada vez haya más desperdicio, por ello, los lugares de depósitos de estos materiales están a su máxima capacidad, lo que genera contaminación con afectaciones al agua y el suelo, y daño a la fauna y flora de estos espacios.



Figura 14. Residuos de obras civiles y demolición.

Nota. Tomado de *Temas y tendencias sobre residuos de construcción y demolición: un meta-análisis*, por J. Aldana y A. Serpell, 2020, <https://n9.cl/56fgk>

Actualmente, los escombros emitidos por las construcciones abordan cerca del 50 % en los botaderos y rellenos sanitarios, a su vez, este sector representa el 23 % de la contaminación atmosférica y el 40 % de la contaminación del agua (Márquez, 2022). Asimismo, otro desafío es la extensa cantidad de partículas finas de polvo originadas con la fragmentación de piedra, la manipulación de cemento o la trabajabilidad de la madera. Estas diminutas partículas invisibles a simple vista son transportadas por el viento a distancias largas, y tienen la capacidad de permanecer suspendidas en el aire durante periodos prolongados (Márquez, 2022).

El desperdicio en las construcciones involucra un amplio campo de materiales utilizados, donde no existe un control específico en la cuantificación de estos, así, se generan fugas económicas y un impacto ambiental que va en aumento. Este fenómeno suscita pérdidas innecesarias de recursos durante el proceso constructivo que va desde la extracción de las materias primas para la generación de los materiales a usar hasta la fase final del proyecto. De este modo, algunas causas puntuales que provocan la existencia de este son las siguientes:

Sobrecompra de materiales: debido a deficiencias en los cálculos, los cambios de diseño o planificación inexistente, se adquieren más materiales de los que se necesitan.

Errores constructivos y desechos: estos errores terminan en demoliciones parciales, en las que el material es desechado, asimismo, la mala gestión de los recortes o embalajes genera más desperdicio.

Cambios en las especificaciones del diseño: muchas veces, este tipo de modificaciones en plena etapa constructiva hace que materiales destinados para cierta actividad dejen de ser tomados en consideración, lo que los lleva a la obsolescencia y al desperdicio.



Figura 15. Residuos de varios materiales de construcción.

Nota. Tomado de *Desperdicio de material de construcción Fotografías e imágenes editoriales*, por Alamy, 2022, <https://n9.cl/xfvum>

1.1.1 Botaderos de escombros de materiales de demolición

Los botaderos de escombros y materiales de construcción son instalaciones dedicadas a la disposición de residuos de construcción y demolición (RCD). A lo largo de la historia, estos lugares han sido clave para la gestión de los desechos generados por actividades de construcción, renovación y demolición. Pese a ello, su operación y manejo plantean desafíos ambientales significativos y ofrecen oportunidades para una gestión sostenible de los RCD (Tam, 2008).

1.1.2 Desafíos Ambientales de los botaderos

Uno de los principales problemas asociados con los vertederos de RCD radica en su capacidad para generar contaminación ambiental. Estos vertederos pueden contener materiales peligrosos, como asbesto o sustancias químicas tóxicas que, si no se manejan apropiadamente, tienen el potencial de filtrarse en el suelo y las aguas subterráneas, lo que es una amenaza para la salud humana y el medio ambiente (Tam, 2008).

Además, la acumulación masiva de RCD en estos vertederos puede ocupar áreas que podrían destinarse a otros fines, lo que resulta en la pérdida de hábitats naturales, la degradación del paisaje y la reducción de la biodiversidad en las zonas circundantes (Tam, 2008).



Figura 16. Botadero El Tambo - Perú.

Nota. Tomado de *Impacto ambiental del manejo de residuos sólidos del botadero “El Porvenir” - El Tambo*, por A. Chucos, 2020,

<https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/8794>

1.1.3 Oportunidades para la Gestión Sostenible

A pesar de los desafíos, los botaderos de escombros y materiales de construcción brindan oportunidades para la gestión sostenible de los RCD. La recuperación y el reciclaje de materiales de construcción pueden reducir significativamente la cantidad de residuos que terminan en los botaderos. Así, materiales como el concreto, el ladrillo y el metal pueden reciclarse y reutilizarse en nuevas construcciones, lo que ahorra recursos naturales y disminuye la demanda de materias primas (Tam, 2008).

De este modo, la posibilidad de obtener energía mediante la incineración controlada de RCD constituye una alternativa factible para disminuir la cantidad de desechos destinados a vertederos, al tiempo que se produce electricidad o calor. En este sentido, los vertederos de escombros y materiales de construcción desempeñan un rol esencial en la gestión de los residuos generados por la construcción y la demolición. A pesar de los desafíos ambientales que conllevan, proporcionan oportunidades para gestionar, de manera sostenible, los RCD mediante el reciclaje, la reutilización y la recuperación de energía. Es pertinente que los Gobiernos, la industria de la construcción y la sociedad en general trabajen juntos para abordar los desafíos ambientales asociados con los botaderos de RCD y aprovechar las oportunidades para una gestión más sostenible de estos materiales.

1.1.4 Nidos o enjambres sísmicos

Los nidos o enjambres sísmicos son un fenómeno intrigante y complejo en la sismología. En las últimas décadas, los científicos han investigado estos eventos sísmicos en un esfuerzo por comprender sus causas y consecuencias. A continuación, se exponen temas para comprender los aspectos clave relacionados con los enjambres sísmicos (Aguilar, 2013).

Definición de Enjambres Sísmicos: los enjambres sísmicos se definen como secuencias de múltiples sismos de baja magnitud que ocurren en una región geográfica específica durante un periodo limitado. Estos eventos se caracterizan por su magnitud relativamente baja y una ubicación geográfica cercana (Jones, 1996). Asimismo, un enjambre sísmico se define como una sucesión de temblores en su mayoría de baja intensidad, lo que carece de un terremoto principal identificable. Estos enjambres son de breve duración, aunque pueden persistir durante días, semanas o meses, y se repiten en ubicaciones específicas. Generalmente, los enjambres sísmicos están vinculados con la actividad geotérmica (USGS, 2008).

Causas de los Enjambres Sísmicos: son diversas y pueden incluir la liberación de estrés en una falla geológica, la interacción de fluidos subterráneos, procesos tectónicos locales y otros mecanismos no completamente comprendidos. Estas causas varían según la ubicación y el contexto geológico (Scholz, 2002).

Monitoreo y Prevención: el monitoreo de enjambres sísmicos es crucial para comprender y analizar la amenaza sísmica en una zona determinada. La recolección de datos mediante redes sísmicas y sistemas de alerta temprana desempeña un rol fundamental en la prevención de desastres, así como en la salvaguarda de vidas y bienes (Allen, 2003).

1.1.5 Enjambres sísmicos en Manabí

Se localizó en las costas de la provincia de Manabí, frente al Cantón Jama, la presencia de un enjambre sísmico desde el 9 de agosto del 2022, caracterizado por la manifestación de sismos de baja magnitud a profundidades menores de 10 km (Instituto Geofísico del Ecuador, 2022).

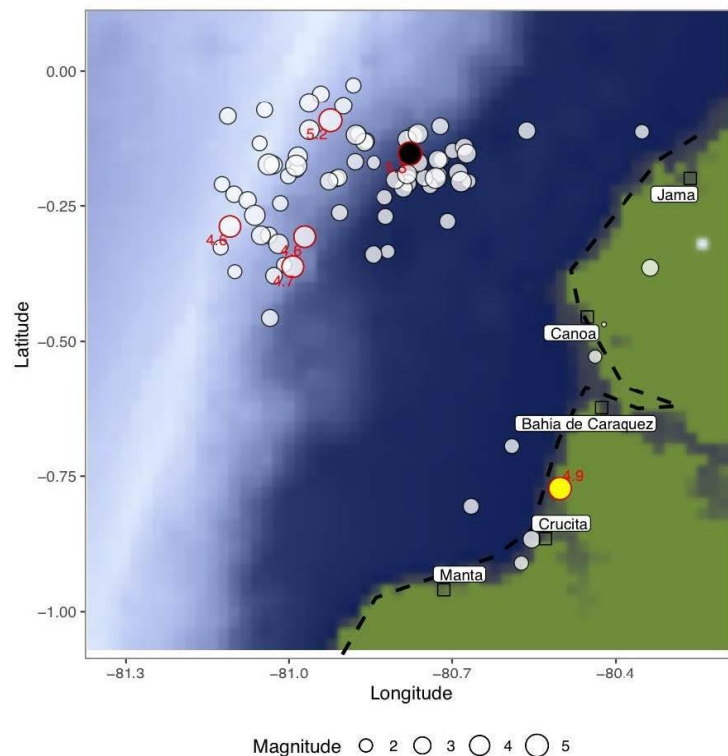


Figura 17. Ubicación de los sismos (círculos) localizados.

Nota. Tomado de *Enjambre sísmico frente a las costas de Jama*, por Instituto Geofísico del Ecuador, 2022, <https://n9.cl/wywx98>

1.1.6 Sismos históricos en el Ecuador

Ecuador es una región sísmicamente activa debido a su ubicación en la zona de subducción de la placa de Nazca bajo la placa sudamericana. A lo largo de la historia, esta ha experimentado una serie de sismos significativos (Quinde, 2016).

1. Terremoto de Ambato (1949):

- Magnitud: 6.7.
- Ubicación: cerca de Ambato, provincia de Tungurahua.
- Conocido como uno de los terremotos más destructivos en la historia de Ecuador, puesto que causó una gran cantidad de víctimas y daños en la ciudad de Ambato y sus alrededores (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, 2015).



Figura 18. Terremoto del 5 de agosto de 1949.

Nota. Tomado de *Catálogo de sismos del Ecuador*, por Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, 2015, <https://www.igeppn.edu.ec/catalogos-sismicos>

2. Terremoto de Quito (1917):

- Magnitud: 6.4.
- Ubicación: cerca de Quito, provincia de Pichincha.

- Este terremoto tuvo un impacto significativo en la ciudad de Quito, pues causó daños considerables en estructuras históricas (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, 2015).

3. Terremoto de Esmeraldas (1906):

- Magnitud: 8.8.
- Ubicación: provincia de Esmeraldas.
- Este terremoto es uno de los más grandes en la historia de Ecuador, así, suscitó daños generalizados y pérdidas humanas en la región de Esmeraldas (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, 2015).

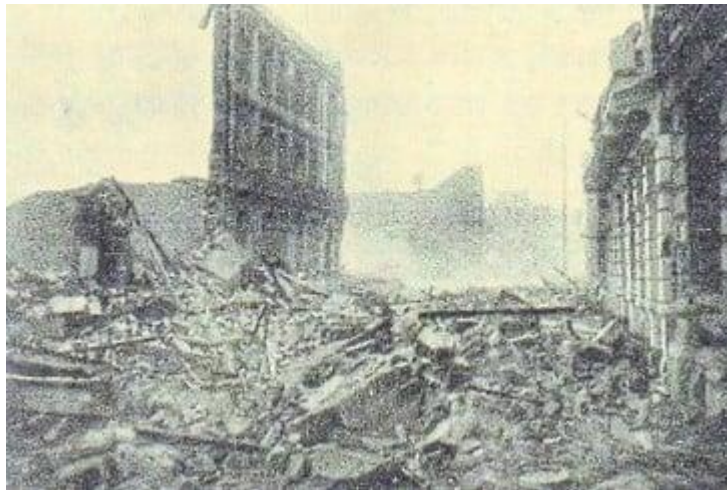


Figura 19. El terremoto y el tsunami de esmeraldas en 1906.

Nota. Tomado de *Catálogo de sismos del Ecuador*, por Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, 2015, <https://www.igepon.edu.ec/catalogos-sismicos>

4. Terremoto de Manabí (2016):

- Magnitud: 7.8.
- Ubicación: provincia de Manabí.
- Este sismo reciente tuvo un impacto devastador en la región costera de Ecuador, con una gran cantidad de víctimas y daños a la infraestructura (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, 2015).



Figura 20. Sismo Pedernales 2016.

Nota. Tomado de *El drama de Pedernales, el pueblo más golpeado por el terremoto en Ecuador*, por P. Mena, 2016, <https://n9.cl/8502u4>

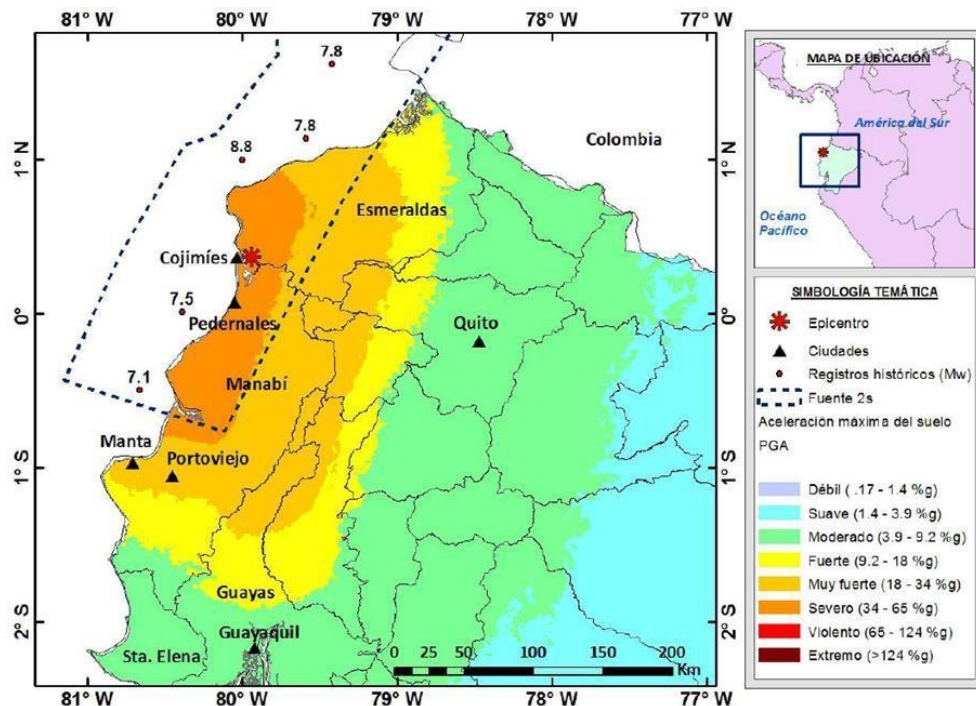


Figura 21. Mapa de aceleraciones producidas en el sismo del 16 de abril de 2016.

Nota. Tomado de Estudio de peligro sísmico de Ecuador y propuesta de espectros de diseño para la Ciudad de Cuenca, por P. Quinde, 2016, *Revista de Ingeniería Sísmica*, (94).

1.1.7 Colapso de edificaciones

Según Kramer (1996), la geología local y las características del suelo desempeñan un rol importante en las caídas de edificaciones. En áreas con suelos no consolidados o propensos a la licuefacción, las edificaciones pueden asentarse o inclinarse durante un sismo, lo que aumenta el riesgo de colapso.

Para enfrentar estos riesgos, es fundamental aplicar en el diseño medidas sísmicas apropiadas que cumplan con los códigos de construcción y regulaciones específicas para áreas propensas a terremotos. Por lo tanto, los ingenieros deben considerar aspectos como los cimientos, los sistemas estructurales, la resistencia al corte y la contención de columnas, con el objetivo de fortalecer la capacidad de los edificios para resistir las fuerzas generadas por los sismos.

Es pertinente la implementación de inspecciones estructurales y geotécnicas posteriores a un sismo para evaluar la seguridad de las edificaciones. Estas evaluaciones permiten determinar si las edificaciones pueden ser ocupadas de manera segura y requieren reparaciones o reforzamientos (Kramer, 1996).



Figura 22. Colapso de edificios en Ciudad de México.

Nota. Tomado de *Las razones por las que colapsaron tantos edificios en Ciudad de México (y no todas son el terremoto)*, por A. Nájjar, 2017, <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-41481250>

1.1.8 Arcillas expansivas

Las arcillas expansivas, que son un tipo de suelo con características particulares, pueden plantear desafíos en los ámbitos de la ingeniería civil y la construcción. En tal marco, estos suelos se distinguen por su habilidad para expandirse y contraerse en respuesta a variaciones en la humedad, lo que puede afectar la estabilidad de estructuras y carreteras; este material tiene una alta concentración de partículas de arcilla en su composición, lo que les confiere la capacidad de retener agua (Mitchell, 1993). Estas características permiten a las partículas del material expandirse al absorber humedad y contraerse al secarse, lo que las hace especialmente propensas a experimentar cambios volumétricos significativos (Mitchell, 1993).

1.1.8.1 Desafíos en la Ingeniería Civil

Fundaciones de Edificaciones: uno de los principales desafíos es ejercer presión sobre las fundaciones de edificaciones. Cuando las arcillas expansivas absorben agua y se expanden, pueden elevar estructuras, lo que provoca daños en cimientos y paredes, así, cuando se secan y se contraen, pueden dejar espacio debajo de las fundaciones, lo que afecta su estabilidad (Cárdenas, 2015).

Carreteras y Pavimentos: las arcillas expansivas pueden causar daños en carreteras y pavimentos al expandirse y contraerse, lo que crea grietas y deformaciones en la superficie. Esto no solo afecta la calidad de las carreteras, sino que puede representar un peligro para la seguridad vial (Cárdenas, 2015).

Deslizamientos de Tierra: las arcillas expansivas pueden contribuir a deslizamientos de tierra cuando se saturan de agua, de esta forma, la expansión repentina puede incrementar la presión en taludes y colinas, lo que provoca movimientos de tierra peligrosos (Cárdenas, 2015). Para abordar los desafíos relacionados con las arcillas expansivas, los ingenieros y geotécnicos utilizan diversas estrategias. Esto incluye la evaluación geotécnica adecuada para identificar suelos expansivos, el diseño de cimentaciones especiales que permitan la expansión y contracción controlada, y la implementación de técnicas de drenaje para controlar la humedad en el suelo (Bowles, 1996).

Las arcillas expansivas son suelos con propiedades únicas que establecen desafíos en la ingeniería civil y la construcción. La comprensión de estas propiedades y la aplicación de estrategias adecuadas para prevenir y mitigar los efectos adversos son clave para garantizar la

seguridad y la estabilidad de las estructuras y las infraestructuras en áreas donde estos suelos son comunes (Bowles, 1996).

1.1.9 Daños en terraplenes por arcillas expansivas

Las arcillas expansivas, con la capacidad de absorber y liberar agua, pueden causar daños significativos en los terraplenes utilizados en carreteras, ferrocarriles y otras infraestructuras. Estos suelos, cuando se expanden y contraen en respuesta a cambios en la humedad, ejercen presiones considerables sobre los terraplenes, lo que suscita problemas de estabilidad y seguridad. A continuación, se exponen los daños comunes en los terraplenes debido a arcillas expansivas y las medidas de mitigación (Mitchell, 1993).

1. **Grietas en la Superficie:** las arcillas expansivas pueden causar la formación de grietas en la superficie de los terraplenes a medida que se expanden por la absorción de agua. Estas grietas no solo afectan la apariencia, sino que pueden comprometer la integridad estructural (Mitchell, 1993)
2. **Inclinación y Deslizamiento:** cuando las arcillas expansivas se expanden y ejercen presión sobre un terraplén, este puede inclinarse o desplazarse lateralmente, lo que incrementa el riesgo de deslizamiento y colapso (Mitchell, 1993).
3. **Erosión:** la expansión y contracción cíclica de las arcillas expansivas pueden llevar a la erosión del terraplén, sobre todo, en las áreas cercanas a los márgenes donde el suelo es más vulnerable (Mitchell, 1993).
4. **Pérdida de Capacidad de Carga:** a medida que las arcillas expansivas se expanden, pueden disminuir la capacidad de carga del terraplén, lo que perjudica su capacidad para soportar la carga de vehículos y tráfico (Mitchell, 1993).

Medidas de Mitigación y Prevención:

1. **Mejora del Drenaje:** la implementación de sistemas de drenaje adecuados es pertinente para controlar la humedad en el terraplén, lo que incluye la instalación de tuberías de drenaje, geotextiles y barreras impermeables para evitar que el agua penetre en el suelo (Alberti, 2006).

2. **Uso de Geosintéticos:** la colocación de geosintéticos, como geotextiles y georedes, en el terraplén puede reducir los efectos adversos de las arcillas expansivas. Estos materiales refuerzan la estructura del terraplén y minimizan la expansión y contracción (Alberti, 2006).
3. **Compactación Adecuada:** la compactación adecuada del terraplén es precisa para reducir la susceptibilidad de los suelos a la expansión y contracción, lo que mejora la estabilidad y la resistencia del terraplén (Alberti, 2006).

1.1.10 Trituración de rocas con pata de cabra

La trituración de rocas con el rodillo de cabra, también conocida como trituración de rocas con compactadores vibratorios de tambor (o compactadores vibratorios de un solo tambor), es un proceso empleado en la construcción y la minería para reducir el tamaño de las rocas y el suelo *in situ*. Los compactadores vibratorios de tambor utilizan vibraciones y presión para romper y compactar las rocas, lo que permite la preparación de terrenos en proyectos de infraestructura y construcción. A continuación, se discuten los aspectos clave de este proceso y se proporciona una referencia bibliográfica relevante (Saran, 2006).

Proceso de Trituración de Rocas con el Rodillo de Cabra:

1. **Preparación del Terreno:** antes de la trituración, es preciso preparar el terreno, lo que puede incluir la eliminación de materiales no deseados, la nivelación y la compactación inicial (Saran, 2006).
2. **Uso del Compactador Vibratorio de Tambor:** el compactador vibratorio de tambor, o "rodillo de cabra", se emplea para triturar y compactar las rocas. Este equipo tiene un tambor pesado que gira y emite vibraciones de alta frecuencia. Las vibraciones y la presión ejercida por el tambor rompen y reducen el tamaño de las rocas en el sitio (Saran, 2006).
3. **Compactación:** además de triturar las rocas, el proceso de compactación garantiza que el suelo resultante sea estable y tenga la densidad adecuada para la construcción de carreteras, cimientos u otras aplicaciones (Saran, 2006).



Figura 23. Rodillo pata de cabra.

Nota. Tomado de *Compactador monocilíndrico vibratorio autopropulsado de patas apisonadoras* , por V. Yépez, 2014, <https://n9.cl/gz5u7>

1.1.11 Uso de rastra para homogenizar

El uso de rastras agrícolas para homogeneizar suelos es una práctica común en la agricultura y la preparación de terrenos, lo que es esencial para nivelar, desmenuzar terrones y mezclar residuos de cultivos en el suelo, para la creación de condiciones ideales para la siembra y el cultivo (Brady, 2016). Las rastras agrícolas son implementos de maquinaria que consisten en discos o dientes montados en un bastidor que se arrastran por el suelo (Buchanan, 2003), así, se utilizan en diversas etapas del proceso agrícola:

1. **Preparación del Suelo:** antes de la siembra, es fundamental preparar el suelo para asegurar una superficie uniforme y libre de obstáculos. Las rastras agrícolas se usan para nivelar el terreno y desmenuzar terrones, lo que crea una superficie óptima para la siembra (Buchanan, 2003).
2. **Mezcla de Residuos de Cultivos:** después de la cosecha de cultivos, es usual que queden restos de plantas en el campo. Las rastras agrícolas ayudan a descomponer y mezclar estos residuos con el suelo, para promover su descomposición y su incorporación al suelo como materia orgánica beneficiosa (Buchanan, 2003).

3. **Control de Malezas:** la homogeneización del suelo por medio de rastras agrícolas puede contribuir al control de malezas. Al nivelar el suelo y desmenuzar terrones, se disminuye la capacidad de las malezas para arraigarse y crecer (Buchanan, 2003).
4. **Mejora de la Eficiencia de la Labranza:** la homogeneización del suelo a través del uso de rastras agrícolas facilita las operaciones de labranza o arado posteriores, lo que ahorra energía y recursos (Buchanan, 2003).



Figura 24. Rastra agrícola.

Nota. Tomado de *Rastra 680*, por John Deere, 2023, <https://n9.cl/v2mp6>

1.1.12 Uso de rotavator para pulverizar

El rotavator, también conocido como rotocultivador o motocultor de fresas rotativas, es una herramienta agrícola empleada para pulverizar y preparar el suelo en la agricultura. Esta máquina está equipada con cuchillas rotativas que giran horizontalmente y trabajan el suelo, por ello, lo desmenuzan y mezclan los residuos de cultivos y la materia orgánica (Brady, 2016).

1.1.12.1 Uso del Rotavator para Pulverizar Suelos

El rotavator se utiliza en diversas aplicaciones agrícolas y hortícolas, donde cumple un rol importante en la preparación del suelo y la mejora de su estructura. Algunos de los usos más comunes del rotavator son los siguientes:

1. **Preparación del Suelo para la Siembra:** el rotavator es una herramienta eficaz para la preparación del suelo antes de la siembra, debido a que las cuchillas rotativas desmenuzan el suelo y lo mezclan, lo que crea una superficie uniforme y suelta ideal para la germinación de semillas y el crecimiento de cultivos (Rodríguez, 2018).
2. **Mezcla de Residuos de Cultivos:** luego de la cosecha, los residuos de plantas y cultivos anteriores pueden quedar en el suelo. El rotavator ayuda a descomponer y mezclar estos residuos con el suelo, lo que permite su descomposición y su incorporación al suelo como materia orgánica beneficiosa (Rodríguez, 2018).
3. **Mejora de la Estructura del Suelo:** el uso regular del rotavator optimiza la estructura del suelo, pues incrementa su capacidad para retener agua y nutrientes, lo que es importante en suelos compactados o arcillosos (Rodríguez, 2018).
4. **Control de Malezas:** al desmenuzar y revolver el suelo, el rotavator contribuye al control de malezas, puesto a que interrumpe el crecimiento de las semillas y raíces de las malezas.
5. **Preparación de Camas de Siembra o Camellones:** en la horticultura y la agricultura de cultivos en hileras, el rotavator se emplea para preparar camas de siembra o camellones (Rodríguez, 2018).



Figura 25. Sicma RD rotavator 210CM

Nota. Tomado de *Rotavator tiller rotativo 210cm sicma*, por Agroscorpio, 2023,
<https://agroscorpio.com/producto/rotavator-rd-210/>

1.1.13 ODS y Sustentabilidad

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un conjunto de 17 metas globales adoptadas por la Asamblea General de las Naciones Unidas en 2015 como parte de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Estos ODS se centran en abordar los desafíos más urgentes a nivel mundial, como la pobreza, la desigualdad, el cambio climático, la preservación del medio ambiente y la promoción de la paz y la justicia. En los ODS, la sostenibilidad emerge como un principio fundamental, lo que implica la capacidad de satisfacer las necesidades actuales sin comprometer la habilidad de las generaciones futuras para cubrir sus propias necesidades (United Nations, 2015). A continuación, se describen los ODS junto con su importancia y aplicación:

1. **Fin de la Pobreza (ODS 1):** el primer objetivo busca poner fin a la pobreza en todas sus formas en el mundo.

2. **Hambre Cero (ODS 2):** pretende acabar con el hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición, y promover la agricultura sostenible.
3. **Salud y Bienestar (ODS 3):** busca garantizar una vida saludable y promover el bienestar para todas las edades.
4. **Educación de Calidad (ODS 4):** tiene el fin de asegurar una educación inclusiva, equitativa y de calidad para todos.
5. **Igualdad de Género (ODS 5):** promueve la igualdad de género y empoderamiento de las mujeres y niñas.
6. **Agua Limpia y Saneamiento (ODS 6):** pretende garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos.
7. **Energía Asequible y no Contaminante (ODS 7):** busca asegurar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos.
8. **Trabajo Decente y Crecimiento Económico (ODS 8):** impulsa el crecimiento económico sostenible y el trabajo decente para todos.
9. **Industria, Innovación e Infraestructura (ODS 9):** tiene el propósito de construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y fomentar la innovación.
10. **Reducción de las Desigualdades (ODS 10):** lucha contra la desigualdad dentro y entre los países.
11. **Ciudades y Comunidades Sostenibles (ODS 11):** pretende que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.
12. **Producción y Consumo Responsables (ODS 12):** promueve el consumo y la producción sostenibles.
13. **Acción por el Clima (ODS 13):** lucha contra el cambio climático y sus efectos.
14. **Vida Bajo el Agua (ODS 14):** conserva y utiliza, de manera sostenible, los océanos, los mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible.
15. **Vida en la Tierra (ODS 15):** protege, restablece y promueve el uso sostenible de los ecosistemas terrestres.

16. **Paz, Justicia e Instituciones Sólidas (ODS 16):** fomenta sociedades pacíficas e inclusivas para el desarrollo sostenible, proporciona acceso a la justicia y construye instituciones efectivas.

17. **Alianzas para Lograr los Objetivos (ODS 17):** fortalece los medios de implementación y revitaliza la alianza mundial para el desarrollo sostenible.

1.1.14 Análisis granulométrico de suelo

El análisis granulométrico en suelos es un método de laboratorio empleado para identificar la disposición de tamaños de partículas presentes en una muestra de suelo. Así, su relevancia se evidencia en campos como la ingeniería civil, la geología y la agricultura, debido a que incide directamente en las características físicas y mecánicas del suelo, por ello, es esencial para comprender y evaluar diversas propiedades relacionadas con la utilización de este recurso en distintas aplicaciones (Juárez, 2005).

La granulometría consiste en fraccionar las partículas presentes en una muestra de suelo según su tamaño. Este procedimiento se ejecuta mediante el uso de tamices con distintas aberturas de malla, dispuestos en secuencia decreciente de tamaño, de este modo, la muestra de suelo se introduce en el tamiz superior y se agita para separar las partículas más grandes. Posteriormente, se realiza la medición del peso de las fracciones retenidas en cada tamiz (Juárez, 2005); a continuación, se exponen algunos conceptos importantes del tema:

- **Porcentaje retenido:** la fracción del suelo que queda en cada tamiz se expresa como un porcentaje del peso total de la muestra (Juárez, 2005).
- **Diámetro equivalente:** es el diámetro de una esfera que tendría el mismo efecto en la superficie específica de las partículas como la distribución real de tamaños (Juárez, 2005).
- **Curva granulométrica:** es un gráfico que ilustra la proporción acumulativa retenida en relación con el tamaño de las partículas. Esta representación es valiosa para analizar la textura del suelo (Juárez, 2005).



Figura 26. Materiales para el ensayo de granulometría.

Nota. Tomado de *Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado*, por E. Aranguren, 2015, <https://n9.cl/b82tc>

1.1.15 Límites de Atterberg

La prueba de límites de Atterberg se utiliza para identificar las propiedades de consistencia de un suelo. Este conjunto de procedimientos está diseñado para evaluar las transiciones entre diversos estados de consistencia del suelo, así, estos límites tienen aplicaciones importantes en campos como la ingeniería civil, la geología y otras disciplinas vinculadas con el suelo, donde se utilizan para describir el comportamiento del suelo y anticipar su respuesta frente a variaciones en las condiciones de carga y humedad (Juárez, 2005). Existen dos límites de Atterberg que se evalúan generalmente:

- **Límite Líquido (LL):** es el nivel más bajo de contenido de agua en un suelo, en el que el suelo cambia de un estado plástico a uno semilíquido. Este límite se establece mediante la prueba del cono de Casagrande, en la que se cuantifica la cantidad de agua requerida para que una ranura de suelo cerrada, conformada de una manera específica, se cierre a lo largo de una longitud determinada (Juárez, 2005).
- **Límite Plástico (LP):** se trata del nivel más bajo de contenido de agua en el que un suelo puede ser modelado en una forma de hilo sin sufrir roturas. La determinación de este límite se lleva a cabo con la copa de Casagrande, y consiste en medir la cantidad de agua necesaria para formar un hilo de suelo con un diámetro de 3 mm sin que se produzcan quiebres (Juárez, 2005).

1.1.16 Índice de plasticidad

El índice de plasticidad (IP) es una característica del suelo derivada de los datos obtenidos en los límites de Atterberg. Este índice brinda datos acerca de la plasticidad del suelo y su habilidad para modificar su forma antes de experimentar rupturas, en tal marco, su aplicación es frecuente en la clasificación de suelos y en el ámbito de la ingeniería geotécnica (Juárez, 2005). El IP se calcula restando el LL del LP, donde la fórmula es la siguiente:

$$IP=LL-LP$$

Donde:

- *IP* es el índice de plasticidad.
- *LL* es el Límite Líquido.
- *LP* es el Límite Plástico.

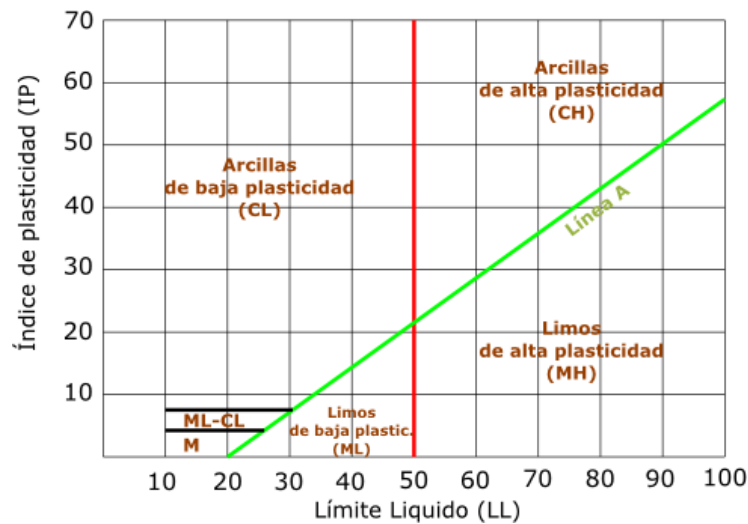


Figura 27. Gráfica de plasticidad SUCS.

Nota. Tomado de *Límites de Atterberg*, por C. Cortéz, 2012, Pearson.

El IP ofrece una evaluación numérica de la plasticidad del suelo. Los suelos con un IP elevado exhiben mayor plasticidad y tienen la tendencia a experimentar deformaciones más pronunciadas antes de llegar a su punto de ruptura. En contraste, los suelos con un IP más bajo son menos plásticos y más propensos a presentar fragilidad (Juárez, 2005). La clasificación de suelos según su IP se puede realizar de la siguiente manera:

- Suelo poco plástico: $IP < 7$.

- Suelo ligeramente plástico: $7 \leq IP \leq 17$.
- Suelo medianamente plástico: $17 < IP \leq 40$.
- Suelo muy plástico: $IP > 40$.

1.1.17 Ensayo de compactación Proctor

La prueba de compactación Proctor, también denominada “ensayo estándar de compactación Proctor”, es un método de laboratorio para analizar la densidad máxima alcanzable y la relación entre humedad y densidad de un suelo. Este procedimiento es clave en ingeniería geotécnica para el diseño y supervisión de la compactación en la construcción de carreteras, terraplenes, cimentaciones y otras estructuras geotécnicas (Juárez, 2005).

Procedimiento:

- 1. Preparación de la muestra:** se toma una muestra representativa del suelo a estudiar, la que se tamiza y se divide en porciones adecuadas para el ensayo (Juárez, 2005).
- 2. Determinación del contenido de humedad inicial:** se pesa una porción de la muestra y se seca en un horno para determinar su contenido de humedad inicial (Juárez, 2005).
- 3. Compactación:** la muestra se coloca en un molde cilíndrico estándar y se compacta con una serie de golpes controlados. Hay dos métodos comunes de compactación Proctor: el método estándar Proctor y el método modificado Proctor, los que se diferencian en la energía de compactación aplicada (Juárez, 2005).
- 4. Medición de la densidad:** después de la compactación, se mide la densidad de la muestra compactada y se determina el contenido de humedad (Juárez, 2005).
- 5. Cálculos:** se calcula la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo correspondiente. Estos valores son útiles para determinar especificaciones de compactación en proyectos de construcción (Juárez, 2005).

La prueba de compactación Proctor permite identificar la cantidad óptima de humedad requerida para que un suelo alcance la máxima densidad durante el proceso constructivo. La curva de compactación resultante ilustra la conexión entre la densidad seca y el contenido de humedad, y se utiliza para establecer las condiciones ideales de compactación en un proyecto

particular. Este ensayo desempeña un rol fundamental para garantizar la estabilidad y la resistencia adecuadas de las estructuras construidas sobre el suelo compactado (Juárez, 2005).

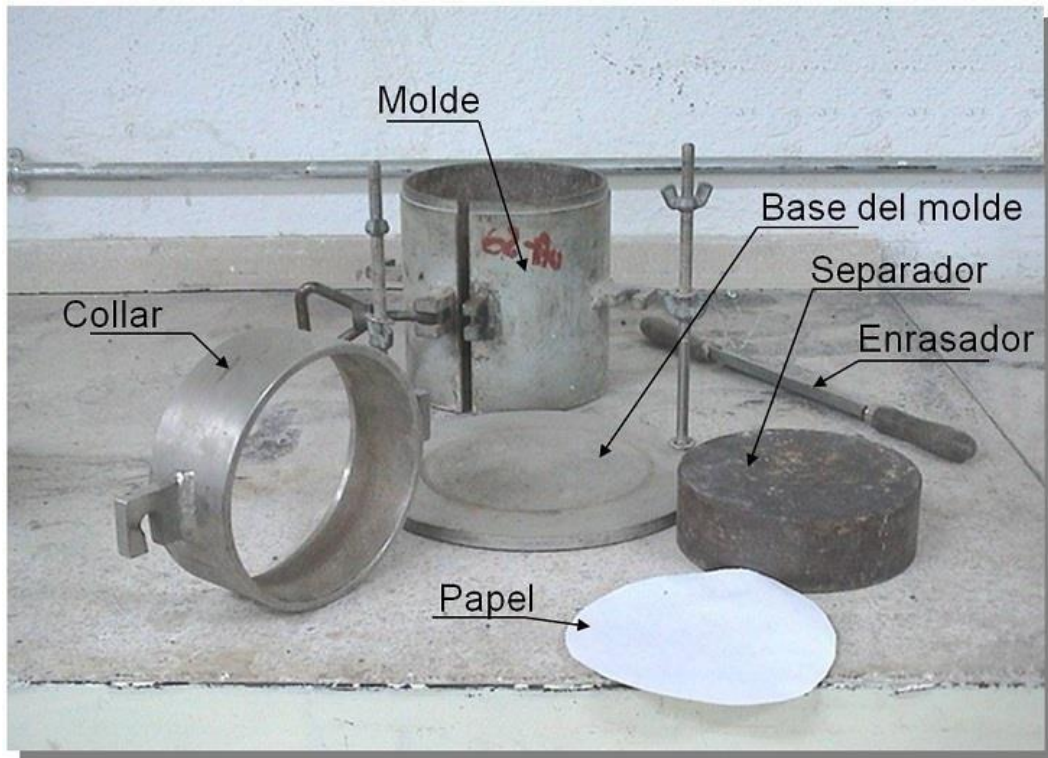


Figura 28. Materiales para el ensayo de compactación Proctor.

Nota. Tomado de *Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado*, por E. Aranguren, 2015, <https://n9.cl/b82tc>

1.1.18 Ensayo de CBR

La prueba de CBR (índice de soporte de California) es un procedimiento de laboratorio utilizado en ingeniería geotécnica para analizar la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones determinadas de humedad y densidad. El resultado de la prueba se presenta como el índice de capacidad de carga relativa, denominado *California Bearing Ratio* (CBR); esta prueba tiene una aplicación extensa en la planificación de pavimentos y cimentaciones (Juárez, 2005).

Procedimiento:

- 1. Preparación de la muestra:** se obtiene una muestra representativa del suelo y se compacta en capas sucesivas en un molde cilíndrico con el uso de un pisón estandarizado. La muestra compactada adopta una forma cilíndrica para que se sature con agua (Juárez, 2005).
- 2. Colocación de la muestra en el aparato:** la muestra saturada se ubica en un dispositivo de prueba que incorpora un penetrómetro con un pistón. El pistón desciende en la muestra a una velocidad uniforme, lo que registra la resistencia que el suelo presenta al corte (Juárez, 2005).
- 3. Registro de cargas y deformaciones:** se registra la carga aplicada al pistón y la deformación del suelo en distintos niveles de penetración (Juárez, 2005).
- 4. Cálculo del CBR:** el índice de CBR se determina al relacionar la carga necesaria para inducir una deformación en el suelo con la carga estándar pertinente para generar la misma deformación en una muestra estándar de roca triturada (Juárez, 2005).

El CBR ofrece una indicación de la capacidad relativa del suelo para resistir cargas en relación con una muestra estándar. A medida que el valor de CBR incrementa, la capacidad del suelo para soportar cargas y resistir deformaciones también aumenta (Juárez, 2005).

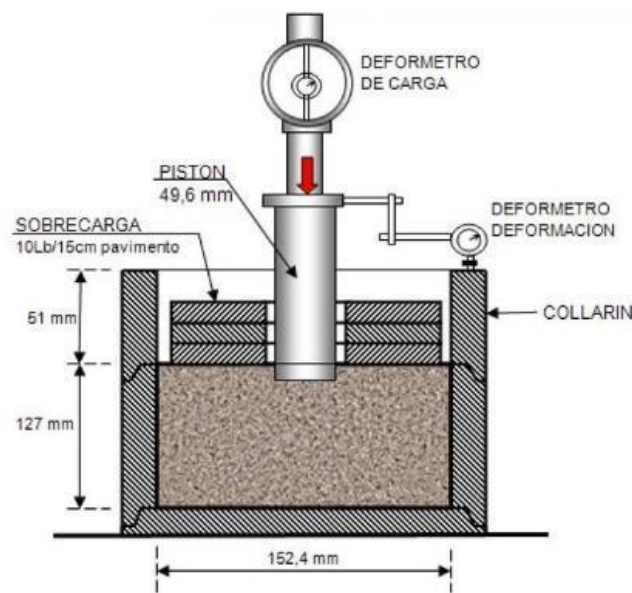


Figura 29. Esquema de máquina para ensayos de CBR.

Nota. Tomado de *Maquina para ensayos de CBR*, por C. Ponce, 2019, s/e.



Figura 30. Máquina Automática para Ensayos de CBR.

Nota. Tomado de *Correlación entre el ensayo de CBR y el ensayo del próctor para determinar la resistencia del suelo de la parroquia Ambatillo Alto en el sector de San Pedro*, por R. Pérez y M.V. Salazar, 2016, <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/23637>

CAPÍTULO II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Deslizamientos de terraplenes construidos con arcillas expansivas

Los desafíos geotécnicos relacionados con los deslizamientos de terraplenes en carreteras tienen un impacto significativo en la seguridad y la integridad de la infraestructura vial. Estos eventos, caracterizados por el desplazamiento no controlado de suelos y materiales de terraplén, adquieren relevancia cuando las carreteras se erigen sobre suelos expansivos, como las arcillas expansivas. La naturaleza expansiva de estos suelos introduce complejidades adicionales por sus notables cambios volumétricos en respuesta a las variaciones en la humedad ambiental (Álvarez, 2012).

La literatura geotécnica señala que es preciso comprender y abordar los riesgos inherentes a los deslizamientos en terraplenes, pues su incidencia puede comprometer la estabilidad de la carretera y la seguridad de quienes la utilizan. La interacción entre las condiciones geotécnicas del suelo y los factores climáticos añade una capa de complejidad a la ingeniería de carreteras, lo que requiere de un enfoque integral en términos de diseño, construcción y mantenimiento (Álvarez, 2012).

De este modo, las investigaciones en este ámbito destacan la necesidad de estrategias preventivas y correctivas que trasciendan el diseño convencional de carreteras. Por ello, es pertinente la monitorización geotécnica continua, la implementación de tecnologías avanzadas y la aplicación de medidas de mitigación específicas para prevenir y reducir los deslizamientos en terraplenes. Asimismo, se enfatiza la integración de conocimientos geotécnicos e ingenieriles para desarrollar soluciones sostenibles y resistentes que garanticen la estabilidad a largo plazo de las carreteras construidas sobre suelos expansivos (Álvarez, 2012).



Figura 31. Zona arcillosa susceptible a deslizamientos.

Nota. Tomado de *San José es muy susceptible a deslizamientos*, por R. Mora, 2016, <https://n9.cl/d1irm>

2.2 Características y propiedades de las arcillas expansivas

Las arcillas expansivas son un tipo de suelo con propiedades distintivas respecto con su respuesta volumétrica ante variaciones en los niveles de humedad. Una de las principales características es la contracción y expansión, pues estas tienen la capacidad de contraerse significativamente cuando pierden gran parte de su porcentaje de humedad y de expandirse cuando absorben agua (Cárdenas, 2015).

Estos cambios volumétricos bruscos, resultado de sus variaciones de humedad, pueden responder a movimientos de suelo y afectar la estabilidad de estructuras construidas sobre la superficie de este tipo de suelo. Otro factor importante vinculados con las propiedades mecánicas de este suelo son los elevados índices de plasticidad que presenta, por ello, estas arcillas son maleables, es decir, pueden deformarse fácilmente (Cárdenas, 2015).

Al expandirse el material se genera la presión de poros, proveniente de la absorción de agua, lo que contribuye a los cambios en la resistencia y la compresibilidad del suelo. La cantidad de agua presente en las partículas de las arcillas genera cambios en su estructura y comportamiento, lo que las hace un material sensible a la humedad (Cárdenas, 2015).

Durante los periodos secos, las arcillas expansivas pueden tener un elevado potencial de contracción, lo que suscita grietas en la superficie, así, esto trascienden a las estructuras que están construidas sobre ellas. Estas arcillas tienden a clasificarse mediante métodos experimentales como el LL y LP, debido a que estos son indicadores de la plasticidad del suelo (Cárdenas, 2015).

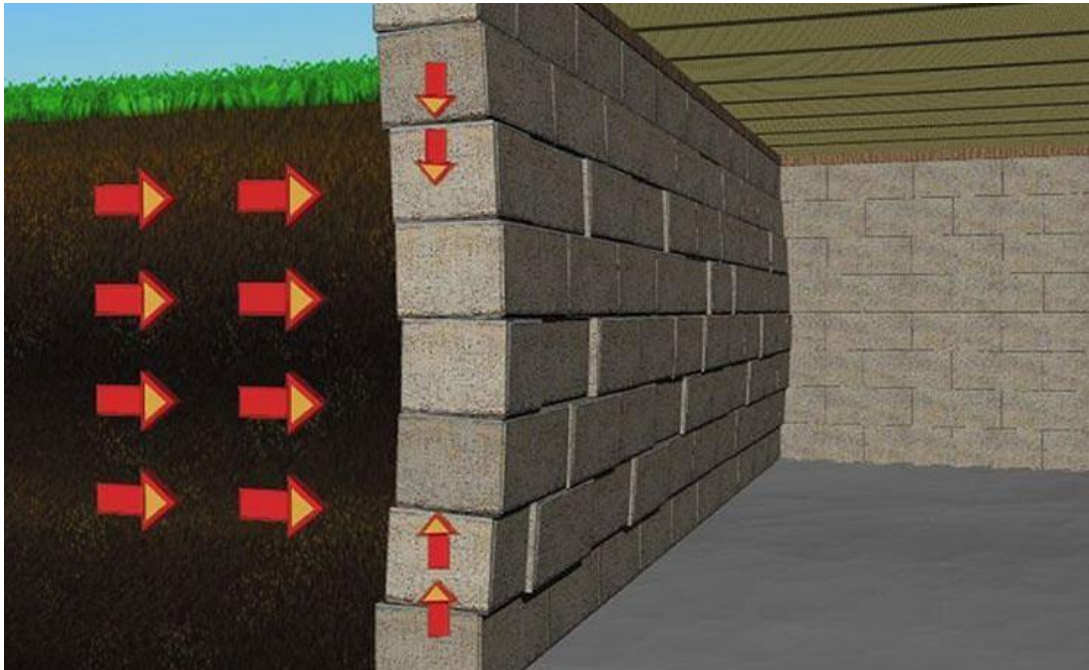


Figura 32. Afectación de las estructuras debido a la expansión lateral de las arcillas.

Nota. Tomado de *Impermeabilizar en suelos expansivos*, por G. Navas, 2016, Special Nets.

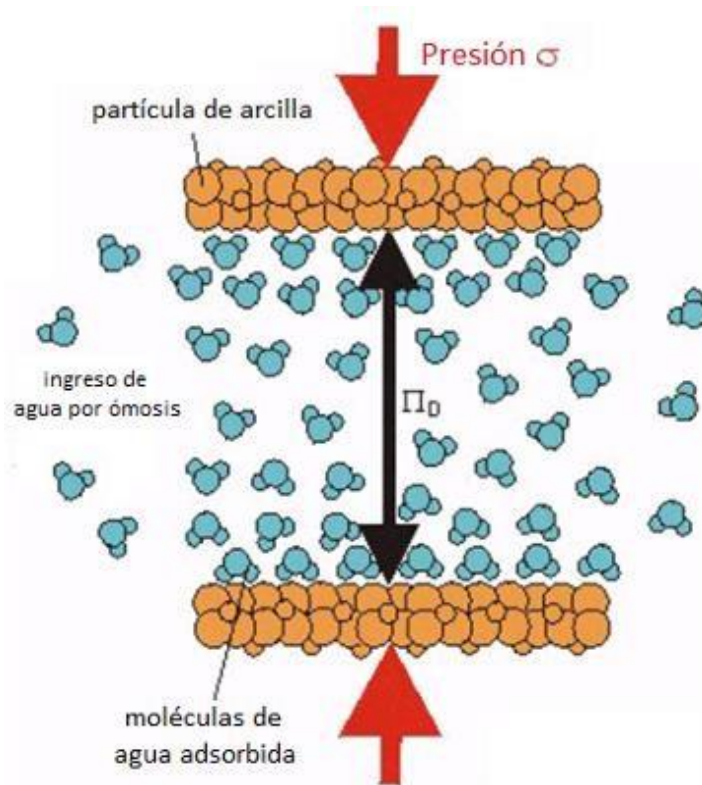


Figura 33. Mecanismo de expansión es la absorción de agua por ósmosis.

Nota. Tomado de *Caracterización de suelos arcillosos y limosos*, por R. Zapata, 2018, <https://n9.cl/ro3ki>

2.2.1 Génesis de las arcillas expansivas

Las arcillas son minerales formados geológicamente por medio de procesos complejos que involucran la descomposición de rocas y minerales preexistentes. Varios principios geológicos son los responsables de la creación de este material, estos varían conforme con su región y condiciones locales.

La descomposición de minerales primarios es una de las causales principales, así, el proceso se inicia mediante la descomposición de minerales primarios, tales como el feldespato y la mica distribuidos en diversas rocas ígneas y metamórficas. Estos minerales albergan silicatos, y el fenómeno de intemperismo químico los descompone, al transformarlos en partículas de menor tamaño (Tarbuck y Ludgens, 2005).

Otro de los principios clave es el imperismo químico, pues conlleva a la descomposición de minerales a través de la influencia de agua, dióxido de carbono y otros compuestos químicos. En este curso de eventos, los minerales originales experimentan una

transición a minerales secundarios, como las arcillas, a través de los procesos de lixiviación y emisión de iones. Asimismo, el proceso de lixiviación y transporte actúa diluyendo y movilizandando las sustancias resultantes de la descomposición de los minerales originales (Tarbuck y Ludgens, 2005).

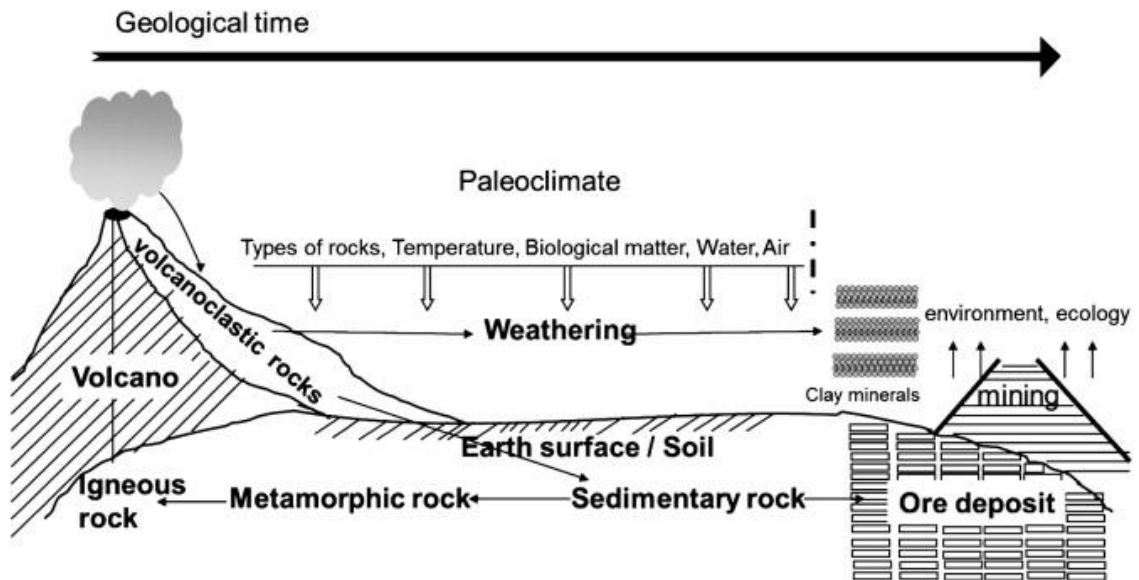


Figura 34. Proceso de formación geomorfológica de las arcillas.

Nota. Tomado de *Fundamental and applied research on clay minerals: From climate and environment to nanotechnology*, por J. Keeling, 2013, Elsevier.

En este sentido, la reacción química entre los iones liberados lleva a la creación de coloides, partículas extremadamente pequeñas cargadas negativamente. Estos coloides se dispersan en el agua, lo que genera una suspensión coloidal que, con el tiempo, evolucionará hacia la formación de arcillas. Finalmente, las partículas coloidales de arcilla son depositadas en zonas de baja energía en el entorno acuático, como lagos o lagunas, donde la velocidad del agua es lo reducida para posibilitar la sedimentación. Con el transcurso del tiempo, estas partículas se comprimen, lo que da origen a sedimentos ricos en arcilla (Tarbuck y Ludgens, 2005).

Cabe destacar que el proceso de formación de arcillas puede variar en velocidad y resultado de acuerdo con diversos factores, como el clima, la composición mineralógica de las rocas preexistentes y la presencia de organismos biológicos. La geología de una región específica puede influir en las características de las arcillas presentes en esa área.

La Figura 35 expone lo siguiente:

(1) Roca madre; (2) Acción mecánica; (3) Acción química; (4) Acción biológica; (5) Acción conjunta mecánica-química-biológica.

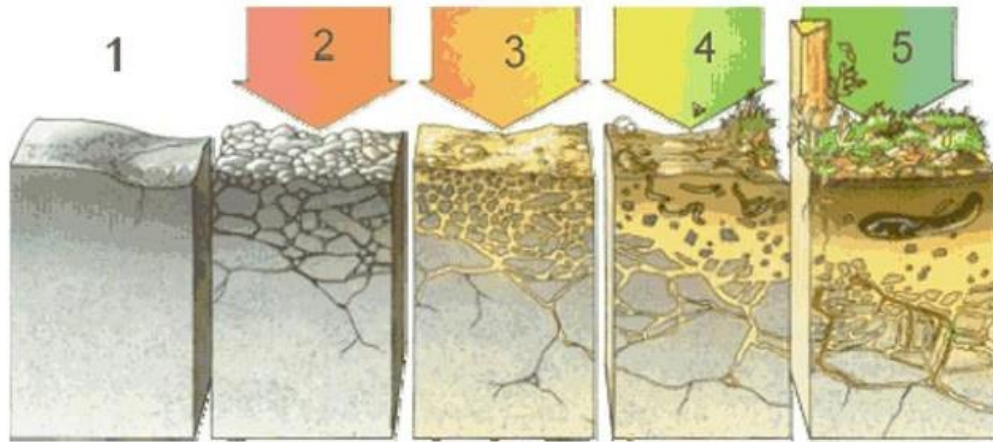


Figura 35. Proceso de formación de los suelos.

Nota. Tomado de *Caracterización de suelos arcillosos y limosos*, por R. Zapata, 2018, <https://n9.cl/ro3ki>

2.3 Deslizamiento de terraplenes

Los deslizamientos de terraplenes constituyen sucesos geológicos que implican el descenso y la alteración de una masa de suelo a lo largo de una pendiente artificialmente creada, como un terraplén. Estos eventos suceden por diversos factores, como la saturación del suelo, la erosión, la falta de compactación adecuada, la presión del agua subterránea, la actividad sísmica u otras condiciones geotécnicas desfavorables (Garnica y Ramírez, 2014).

La construcción de terraplenes es frecuente en proyectos de ingeniería civil, como carreteras, ferrocarriles, represas y vertederos. Estas estructuras elevadas proporcionan una superficie nivelada sobre terrenos irregulares, pero la estabilidad de los terraplenes puede comprometerse si no se toman medidas pertinentes durante la fase de planificación, diseño y construcción (Garnica y Ramírez, 2014).

Cuando se produce un deslizamiento de terraplenes, la masa de suelo puede desplazarse de forma repentina o progresiva, lo que ocasiona daños a la infraestructura y resultan en la pérdida de vidas y propiedades. La prevención y mitigación de estos deslizamientos requieren la aplicación de prácticas de ingeniería geotécnica, un monitoreo continuo de la estabilidad del terreno y la implementación de medidas correctivas para reducir los riesgos asociados (Garnica

y Ramírez, 2014). En esta línea de ideas, la comprensión de los factores geológicos y geotécnicos, junto con la utilización de tecnologías modernas de monitoreo, es fundamental para evitar y gestionar, efectivamente, los deslizamientos de terraplenes, con el fin de garantizar la seguridad a largo plazo de las estructuras construidas sobre estas elevaciones artificiales (Garnica y Ramírez, 2014).



Figura 36. Deslizamiento del terraplén de la vía en la Provincia de Manabí.

Nota. Elaboración propia

2.3.1 Mecanismos y causas de deslizamientos en terraplenes.

Los deslizamientos en terraplenes pueden tener múltiples mecanismos y causas asociadas que provienen de diferentes puntos de origen. Como uno de los factores principales, se tiene la saturación del suelo, así, con agua reduce la resistencia interna y la cohesión, lo que puede llevar a la pérdida de estabilidad, esto es producto de lluvias intensas, deshielo repentino, o mal drenaje que suscita la acumulación de agua en el terraplén (Díaz, 1998).

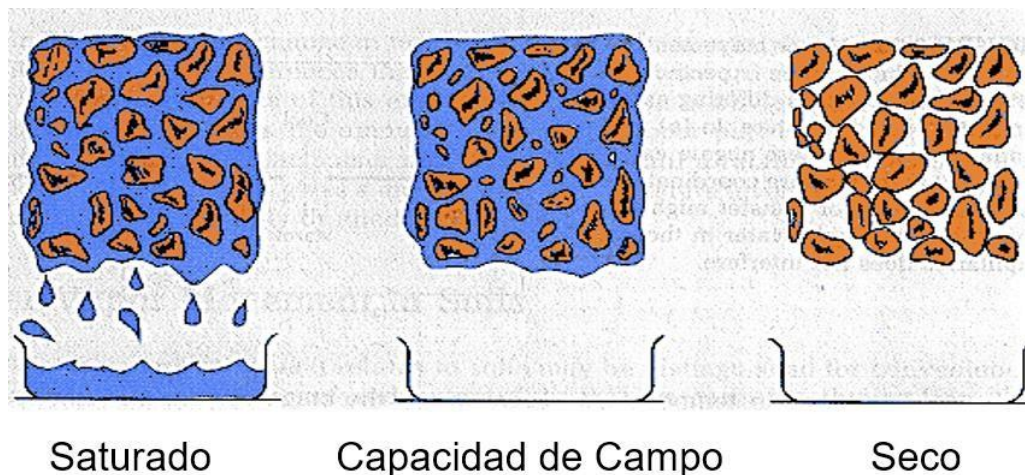


Figura 37. Demostración gráfica de la saturación del suelo. Poros, espacio aéreo y agua del suelo en situaciones de saturación, capacidad de campo y seco.

Nota. Tomado de *La capacidad de campo de un suelo: técnicas para su medición*, por J. Castro, 2018, <https://n9.cl/uw576b>

De este modo, la erosión retira capas de suelo, lo que debilita la estructura del terraplén; esta acción es causa de lluvias fuertes, acción del viento o actividades humanas que desgastan la superficie. Asimismo, la falta de compactación adecuada resulta en suelos con baja densidad y resistencia, debido a prácticas poco eficientes durante la etapa del movimiento de tierras, como compactación inadecuada de capas de suelo (Díaz, 1998).

Los altos niveles de agua subterránea por los factores como cambios de estaciones, las que producen lluvias persistentes, o cambios en la hidrología local, generan una cierta presión en el subsuelo ejercida por el agua, la que reduce la fricción interna y produce deslizamientos. Así, la actividad sísmica, a través de las tensiones que genera en el suelo, desencadena deslizamientos al cambiar las condiciones de equilibrio del terraplén (Díaz, 1998).



Figura 38. Fallo del terraplén de la carretera durante el terremoto M 5.0.

Nota. Tomado de *¿Cuál es la magnitud más pequeña de un terremoto que debe considerarse al evaluar el peligro de licuefacción?*, por R. Green, 2019, <https://n9.cl/s8d5qx>

Por otro lado, la selección de materiales, el diseño inadecuado y la mala práctica profesional en la construcción son causas comunes en el medio, por ende, estos errores en el diseño o construcción debilitan la estructura del terraplén, lo que provoca una mayor inestabilidad y su colapso. Estas malas prácticas se dan cuando se realizan las modificaciones de la forma del terraplén, como los cortes o rellenos adicionales, lo que produce alteraciones en la geometría, con afectaciones en la distribución de cargas y tensiones del mismo (Díaz, 1998).

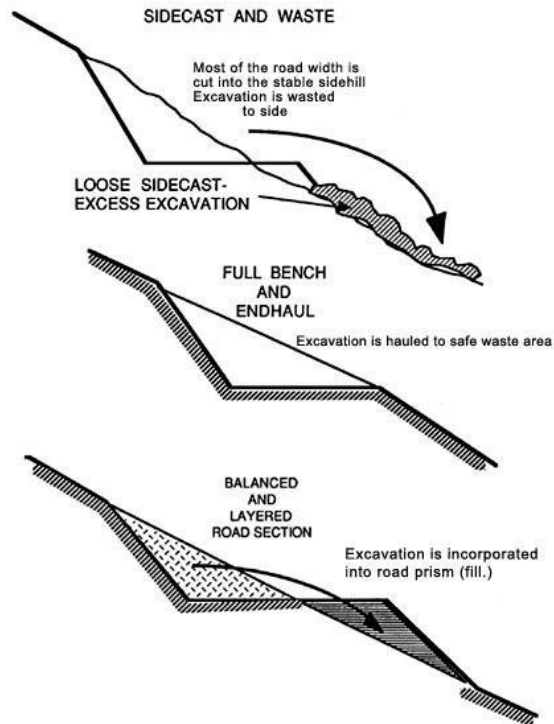


Figura 39. Cortes y rellenos en terraplenes.

Nota. Tomado de *Watershed management field manual*, por P. Sainz, 2012, s/e.

2.3.2 Factores geotécnicos que afectan la estabilidad de terraplenes

La estabilidad de un terraplén está influenciada por las características del suelo empleado, en tal marco, los ingenieros evalúan las propiedades geotécnicas del suelo, tales como su cohesión, capacidad de drenaje, resistencia al corte y compresibilidad. Los suelos cohesivos, como arcillas y limos, pueden experimentar compresión y expansión con variaciones en la humedad, lo que afectaría su estabilidad. En contraste, los suelos granulares, como arena y grava, podrían ofrecer una capacidad de drenaje superior, aunque también pueden ser vulnerables a la erosión (Melentijevic y Morilla, 2014).

La técnica de compactación juega un rol crucial en la estabilidad del terraplén, para alcanzar una densidad óptima del suelo, con el fin de reducir la presencia de agujeros y mejorar la resistencia. La compactación adecuada permite evitar la consolidación excesiva y asegura una plataforma más robusta frente a cargas estáticas y dinámicas (Melentijevic y Morilla, 2014).

Además, la geometría del terraplén, incluyendo su inclinación o talud, son factores clave. De este modo, un diseño apropiado del talud y una geometría precisa ayudan a contrarrestar las fuerzas gravitacionales, para prevenir posibles deslizamientos o colapsos. Es esencial considerar, de manera cuidadosa, las cargas aplicadas, como el tráfico vehicular, ferroviario u otras fuerzas externas que puedan incidir en la estructura, pues estas cargas pueden impactar en su estabilidad (Melentijevic y Morilla, 2014).

Las condiciones ambientales que incluyen factores como la temperatura, la humedad y las variaciones estacionales también desempeñan un rol fundamental en la estabilidad del terraplén, en vista de que las alteraciones en estas condiciones pueden influir en las propiedades del suelo y en su comportamiento, con un impacto directo en la estabilidad de la estructura (Hernández, 2021).

2.3.3 Ausencia de protección de terraplenes y taludes en carreteras

La protección de la estabilidad y seguridad de las infraestructuras viales es esencial en la protección de taludes y terraplenes en carreteras. Los taludes, que son inclinaciones naturales o artificiales a lo largo de las carreteras, y los terraplenes, elevaciones construidas artificialmente, se exponen diversos factores que podrían comprometer su integridad, como la erosión, la acción del agua y la gravedad. Para mitigar estos riesgos y asegurar la resistencia a lo largo del tiempo, se aplican una variedad de técnicas y medidas de protección (Soto, 2011).

Estas estrategias abarcan desde la utilización de revestimientos vegetativos para prevenir la erosión hasta la edificación de muros de contención que resisten las fuerzas laterales del suelo. Igualmente, se utilizan sistemas de drenaje apropiados, como cunetas y tuberías, para evitar la acumulación de agua, así como materiales como geomallas y geotextiles para fortalecer la estabilidad del suelo. La utilización de sistemas de anclaje y la ejecución de programas periódicos de mantenimiento es pertinente para identificar y abordar posibles problemas antes de que se conviertan en amenazas significativas (Soto, 2011).

Asegurar la estabilidad de taludes y terraplenes en carreteras implica adoptar un enfoque holístico que considere aspectos geológicos, climáticos, topográficos e ingenieriles. La colaboración entre expertos de distintas disciplinas es esencial para desarrollar soluciones efectivas y sostenibles que garanticen la seguridad y la resistencia a lo largo del tiempo de las carreteras (Soto, 2011).

En muchas zonas de la provincia de Manabí, sea en carreteras o sitios urbanos, es nula la protección de taludes y terraplenes, lo que hace altamente riesgosa la seguridad de los usuarios que transcurren en dichas zonas, sobre todo, en épocas invernales donde estas estructuras pueden tener deslizamientos. En muchos casos, los propios habitantes toman medidas empíricas y rústicas para controlar o disipar estos accidentes, poniendo sacos de arena o cañas para evitar el deslizamiento, pese a ello, estas medidas sirven poco para tratar correctamente el problema.



Figura 40. Talud sin la correcta protección en la ciudad de Manta, Manabí.

Nota. Tomado de *Laderas quedan sin protección*, por El Diario Ecuador, 2019, <https://www.eldiario.ec/noticias-manabi-ecuador/508474-laderas-quedan-sin-proteccion/>

2.3.4 Revestimiento vegetal para prevenir deslizamientos en terraplenes

La función de los revestimientos vegetativos en la salvaguarda de taludes y terraplenes en carreteras es brindar soluciones eficaces y respetuosas con el medio ambiente para reducir los riesgos relacionados con la erosión y preservar la estabilidad del suelo (Castro, 2010).

Estos recubrimientos, también denominados coberturas vegetales, consisten en la implantación planificada de vegetación en las pendientes y elevaciones en las carreteras. La vegetación juega un rol crucial al arraigar el suelo, pues proporciona una capa adicional de defensa contra la erosión originada por las precipitaciones y otros elementos climáticos (Castro, 2010).

Algunos de los aspectos positivos asociados con los revestimientos vegetativos abarcan la prevención de la erosión del suelo, la absorción de agua superficial y la disminución de la velocidad del flujo hídrico en la pendiente. Estas plantas son importantes en la estabilización de la estructura del suelo, debido a que reducen el riesgo de deslizamientos y movimientos no deseados en los taludes y terraplenes (Castro, 2010).



Figura 41. Control de erosión del suelo con cobertura vegetal.

Nota. Tomado de *Control de taludes de Marienberg: solución eficiente para la protección de taludes*, por A. Plaza, 2017, <https://n9.cl/n5mi5>

La cuidadosa elección de especies vegetales adaptadas a las condiciones locales es esencial para maximizar la eficacia de los revestimientos vegetativos. Especies con sistemas de raíces extensos y robustos son beneficiosas, pues anclan el suelo de manera eficiente, actuando como una defensa natural contra la erosión (Castro, 2010).

Además de su propósito técnico, los revestimientos vegetativos tienen la capacidad de mejorar la estética del entorno vial, lo que contribuye a la integración armoniosa de la infraestructura con el paisaje circundante. Este enfoque sostenible no solo resguarda la estabilidad de los taludes y terraplenes, sino que fomenta la biodiversidad y la salud general del ecosistema circundante (Castro, 2010).

Los revestimientos vegetativos constituyen una estrategia completa y respetuosa con el medio ambiente para la protección de taludes y terraplenes en carreteras, lo que brinda beneficios en términos técnicos y estéticos, asimismo, garantizan la seguridad y la durabilidad a largo plazo de la infraestructura vial (Castro, 2010).



Figura 42. Aportación de estabilidad y estética de la cobertura vegetal al terraplén.

Nota. Tomado de *Control de taludes de Marienberg: solución eficiente para la protección de taludes*, por A. Plaza, 2017, <https://n9.cl/n5mi5>

2.3.5 Métodos de análisis de estabilidad de terraplenes

Según Garnica y Ramírez (2014), la evaluación de la estabilidad de terraplenes abarca diversas estrategias que analizan la capacidad de estas estructuras para resistir las fuerzas y presiones que se les aplican. Un enfoque clave es el "método de equilibrio límite", el que descompone el terraplén en segmentos horizontales o "rebanadas", así, se calculan las fuerzas de corte, se tiene en cuenta el peso propio del suelo y se evalúa la resistencia al corte del material para determinar la estabilidad global y prevenir posibles deslizamientos o fallos.

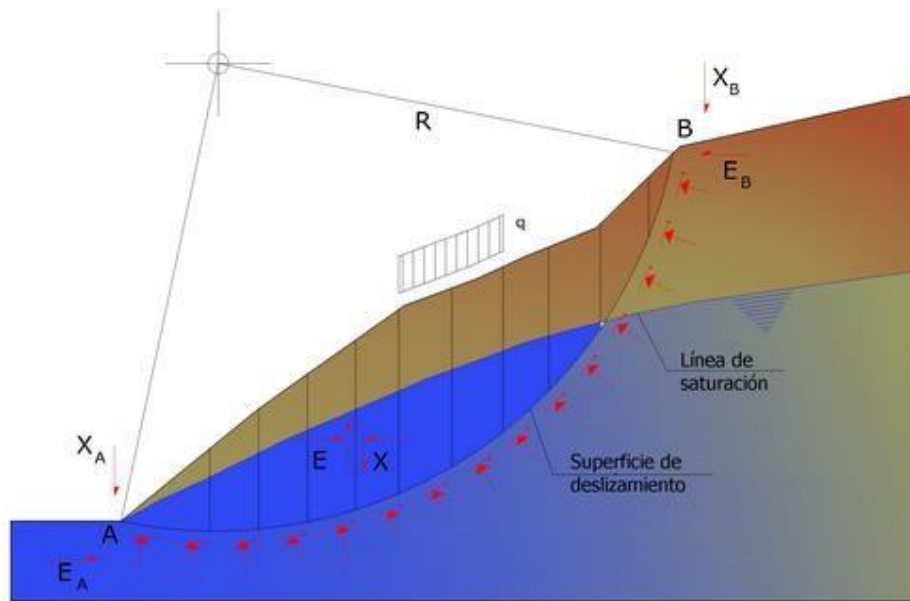


Figura 43. Sección de cálculo de un talud por el método de equilibrio límite.

Nota. Tomado de *Estabilidad de Taludes: Conceptos Básicos, Parámetros de Diseño y Métodos de Cálculo*, por R. Valiente, 2019,

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/76781/taludes.pdf>

Otra técnica usual es el análisis por "elementos finitos", la que utiliza una subdivisión del terraplén en secciones más pequeñas y aplica modelos matemáticos avanzados para simular el comportamiento del suelo y las cargas aplicadas. Es útil para considerar factores complejos como la interacción entre el agua y el suelo, así como las cargas dinámicas, por medio del *software* especializado en análisis de elementos finitos (Garnica y Ramírez, 2014).

Las técnicas de análisis probabilístico se basan en tener en cuenta la incertidumbre presente en los datos geotécnicos y las variaciones en las condiciones del terreno. Estos métodos evalúan la probabilidad de fallo del terraplén ante diversas situaciones de carga y condiciones del suelo, con una perspectiva más completa de los riesgos vinculados con la estabilidad de la estructura (Garnica y Ramírez, 2014).

Independientemente de la metodología empleada, es fundamental disponer de información precisa acerca de las características del suelo, la disposición del terraplén y las cargas que soportará; estos análisis permiten garantizar la seguridad y cumplir con los estándares de estabilidad necesarios en la edificación de terraplenes. Es preciso complementar estos análisis con inspecciones regulares y monitoreo continuo para detectar posibles cambios que puedan incidir en su estabilidad con el transcurso del tiempo (Garnica y Ramírez, 2014).

2.3.6 Métodos de muestreo de suelos para evaluar la expansividad de las arcillas

La elección del método de muestreo para evaluar la expansividad de las arcillas tienen ventajas y desventajas particulares que deben ser consideradas al seleccionar la opción más apropiada. La decisión sobre el método adecuado depende de diversos factores clave, tales como la profundidad deseada para la investigación, la disponibilidad de recursos técnicos y financieros, así como el nivel de precisión necesario para analizar las características del suelo (Fernández-Gutiérrez et al., 2022).

La profundidad del estudio puede influenciar la elección del método de muestreo, puesto que algunos son más eficaces en investigaciones superficiales, mientras que otros permiten abordar estratos más profundos. Además, la disponibilidad de recursos, incluyendo equipos especializados, personal capacitado y laboratorios para efectuar pruebas específicas, puede perjudicar la elección del método más pertinente (Fernández-Gutiérrez et al., 2022).

La precisión requerida para evaluar la expansividad de las arcillas es un factor crucial, pues algunos métodos brindan mediciones más precisas y detalladas que otros. En última instancia, se deben seguir estándares y procedimientos rigurosos durante el proceso de muestreo para asegurar resultados confiables, precisos y representativos del suelo en cuestión, lo que permite la toma de decisiones en proyectos de ingeniería y construcción (Fernández-Gutiérrez et al., 2022).

Método de muestras alteradas: implica tomar muestras del suelo en su estado natural sin mantener su integridad. Estas muestras se usan para determinar la presencia de arcillas expansivas mediante observaciones visuales y ensayos sencillos de campo (Fernández-Gutiérrez et al., 2022).



Figura 44. Muestras alteradas obtenidas de sondeo a rotación mediante batería simple.

Nota. Tomado de *Muestras alteradas o representativas*, por F. Ruiz, 2020, <https://n9.cl/hnem7>

Método de muestras inalteradas: se extraen muestras del suelo sin modificar su estructura original. Estas muestras posibilitan realizar pruebas de laboratorio más precisas para evaluar la expansividad de las arcillas, así, se utilizan para realizar ensayos como el IP, LL y contracción-expansión (Fernández-Gutiérrez et al., 2022).



Figura 45. Muestras inalteradas, obteniendo la estructura y humedad natural del suelo.

Nota. Tomado de *Forma de suelos alterados e inalterados*, por R. Mezarino, 2022, Universidad Agraria de la Selva.

Método de perforación y extracción de testigos: se utiliza una perforadora para obtener testigos de suelo a profundidades específicas, los que se extraen y utilizan para realizar pruebas de laboratorio, como ensayos de expansión libre y ensayos de corte directo, con el fin de evaluar las características expansivas de las arcillas (Fernández-Gutiérrez et al., 2022).



Figura 46. Prueba de perforación a rotación y recuperación de testigos.

Nota. Tomado de *Perforación a rotación y recuperación de testigo*, por M. Broseta, 2016, <https://wellpoint.es/perforacion-a-rotacion-y-recuperacion-de-testigo/>

Pruebas de campo in situ: se realizan pruebas en el sitio, como el método de hinchamiento con varillas, donde se insertan varillas en el suelo y se mide la expansión del terreno al incrementar la humedad. Así, se pueden usar métodos geofísicos para evaluar la presencia y comportamiento de arcillas expansivas a través de mediciones eléctricas o de densidad (Fernández-Gutiérrez et al., 2022).

2.4 Especificaciones técnicas para la construcción de terraplenes según el manual del MTOP.

2.4.1 Generalidades

El MTOP (2002) describe la construcción de terraplenes iniciando con la colocación de materiales aprobados provenientes de los cortes, donde se formarán capas debidamente niveladas, humidificadas o expuestas al aire y compactadas, incluyendo la preparación esencial de las áreas donde se construirán los terraplenes, la colocación y compactación de material para sustituir aquel que sea inadecuado y haya sido retirado.

Antes de comenzar la construcción de terraplenes, se deben llevar a cabo las acciones requeridas de desbroce y eliminación de vegetación. Los espacios excavados y huecos producto de la limpieza u otras circunstancias serán rellenados meticulosamente en capas compactadas dentro del área destinada al terraplén (MTOPE, 2002). En este sentido, el estrato superior de 15 cm del suelo que se encuentra debajo de un terraplén debe ser compactado con el mismo nivel de rigurosidad pertinente para el material que será colocado en el terraplén. En el caso de que el terraplén deba ser instalado sobre un camino preexistente, la capa superficial de dicho camino, hasta una profundidad de 15 cm, deberá ser preparada con escarificación y compactación. Todas las obras de drenaje indicadas en los planos deben estar completas antes de iniciar la colocación del material para el terraplén (MTOPE, 2002).

El área del suelo sobre la que se va a cimentar el terraplén debe ser acondicionada en forma escalonada, con la creación de terrazas con una superficie final horizontal. Esta superficie será compactada con la misma meticulosidad aplicada a las diversas capas del terraplén. El proceso de preparación del lecho del terreno iniciará desde la base del talud del terraplén para instaurar el primer escalón que se integrará con el terraplén que se va a construir (MTOPE, 2002).



Figura 47. Terrapién escalonado.

Nota. Tomado de *Construcción De Terrapién*, por I. Perdomo, 2010, <https://construcciondeterrapien.blogspot.com/2010/04/en-ingenieria-civil-se-denomina.html>

La posición y el ancho de las terrazas seguirán las especificaciones delineadas en los planos, sin embargo, en todo momento, su amplitud garantizará la eficaz operación del equipo encargado de la colocación y compactación. El material apropiado extraído en la excavación para las terrazas será integrado en los terraplenes (MTOP, 2002).

En el caso de terraplenes con alturas inferiores a 2,0 m hasta el nivel de la subrasante, después de limpiar la superficie de asiento según las especificaciones y retirar la capa vegetal, se ejecutará la fragmentación completa del suelo con el uso de arados o escarificadores, alcanzando una profundidad de 15 cm. Una vez que la superficie esté preparada conforme con estas indicaciones, se procederá a nivelarla y compactarla (MTOP, 2002).

2.4.2 Colocación

Durante la edificación de terraplenes, es preciso disponer el material que consiste en tierra, grava, fragmentos de roca y otros elementos relativamente finos en capas aproximadamente horizontales. Cada una de estas capas debe ser humedecida o expuesta al aire para alcanzar el contenido de humedad óptimo antes de proceder con el alisado, conformado y compactación; cabe añadir que este proceso se repite antes de colocar la siguiente capa (MTOP, 2002).

Se requiere la aprobación del fiscalizador para todo material que se vaya a agregar a los terraplenes, el que no debe contener vegetación, troncos, raíces ni cualquier otro componente perecedero. En situaciones donde sea posible seleccionar materiales de la excavación, se dará preferencia al material de mayor calidad para las capas superiores de los terraplenes (MTOP, 2002).

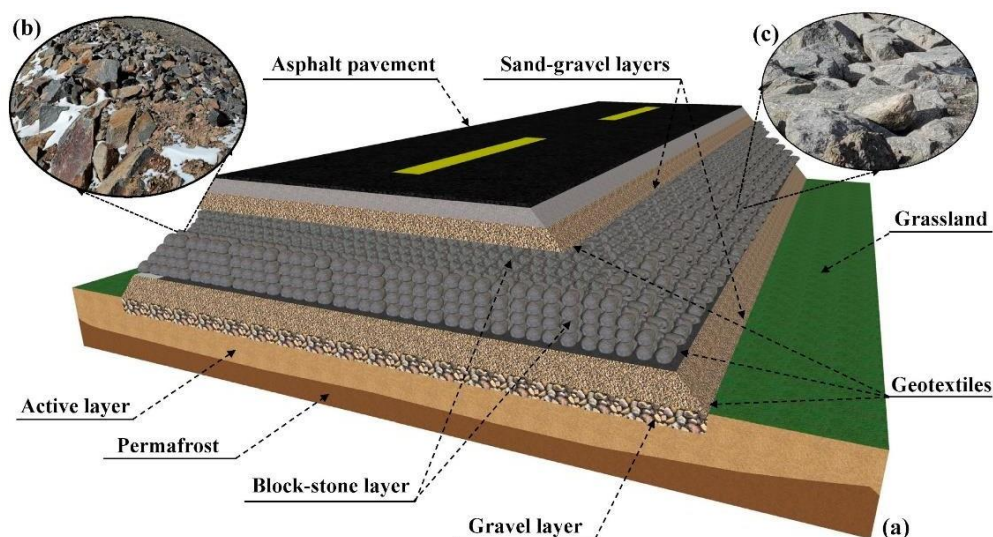


Figura 48. Especificaciones de materiales en diseño de terraplén.

Nota. Tomado de Damage Properties of the Block-Stone Embankment in the Qinghai–Tibet Highway Using Ground-Penetrating Radar Imagery, por V. Baiocchi, 2022, *Remote Sens*, 14(12).

2.4.3 Principios de diseño para terraplenes en áreas con arcillas expansivas

Para el diseño de terraplenes en zonas con suelos arcillosos expansivos, se requiere de una minuciosa investigación geotécnica que implica un análisis detallado de las propiedades del suelo, con enfoque en las características expansivas de la arcilla, como el contenido de humedad, plasticidad, contracción y expansión. La comprensión de estos elementos es esencial para prever y mitigar los posibles efectos adversos de la expansión del suelo, lo que permite la toma de decisiones fundamentadas durante el proceso de diseño y construcción del terraplén (De Souza y Soares, 2013).

La gestión de la humedad constituye una consideración crucial, pues se debe mantener bajo control la humedad del suelo para evitar la expansión excesiva de la arcilla. Así, es posible utilizar estrategias de drenaje eficaces, como sistemas subterráneos de drenaje, para supervisar y regular la humedad, reduciendo los impactos de la expansión y asegurando la estabilidad a largo plazo del terraplén (De Souza y Soares, 2013).

Es necesario llevar a cabo una compactación adecuada en el relleno del terraplén para contrarrestar la expansión de la arcilla. La compactación controlada y estratificada del suelo minimiza su capacidad de expansión, lo que garantiza una base sólida y estable para la estructura del terraplén (De Souza y Soares, 2013).

Por otro lado, se deben implementar medidas para controlar la erosión superficial, puesto que esta puede aumentar la exposición del suelo a la humedad, lo que podría provocar una mayor expansión de la arcilla. Así, se deben monitorear las condiciones durante la construcción para evitar la exposición prolongada del suelo a condiciones climáticas extremas que puedan perjudicar su capacidad de expansión (de Souza y Soares, 2013). El diseño estructural debe contemplar las potenciales deformaciones derivadas de la expansión de la arcilla, por ello, realizar modificaciones en la geometría del terraplén y adoptar sistemas de drenaje apropiados son elementos cruciales en este contexto (De Souza y Soares, 2013).

De igual manera, es preciso implementar sistemas de seguimiento y monitoreo ininterrumpido que posibilitan la evaluación constante de las condiciones del suelo y las estructuras erigidas, lo que permite identificar cambios en las propiedades del suelo y aplicar medidas correctivas de manera oportuna, si fuera necesario. Este monitoreo constante asegura la estabilidad a largo plazo de los terraplenes en zonas con arcilla expansiva (de Souza y Soares, 2013).

2.5 Tecnologías y soluciones innovadoras

Para Soto (2011), la gestión efectiva de deslizamientos de terraplenes, fenómenos que pueden comprometer la estabilidad de estructuras y carreteras, ha experimentado avances notables gracias a soluciones innovadoras que buscan prevenir y mitigar los riesgos asociados con los deslizamientos, con la incorporación de tecnologías avanzadas y enfoques creativos en la ingeniería geotécnica.

Desde sistemas de monitorización inteligente hasta técnicas de refuerzo del suelo, estas innovaciones son una respuesta proactiva a los desafíos que plantea la inestabilidad de las laderas. La prevención y la reducción de deslizamientos en terraplenes son aspectos primordiales en la ingeniería geotécnica, así, en este contexto, el progreso tecnológico es importante (Soto, 2011).

Las tecnologías y soluciones innovadoras han modificado la capacidad para anticipar, supervisar y abordar los desafíos vinculados con los deslizamientos en terraplenes. Desde sistemas avanzados de instrumentación geotécnica hasta métodos de estabilización más eficientes, estas soluciones brindan herramientas poderosas para garantizar la seguridad y la estabilidad a largo plazo de las infraestructuras (Soto, 2011).

2.5.1 Desarrollos tecnológicos para prevenir o mitigar deslizamientos en terraplenes

En el ámbito de la ingeniería geotécnica, enfrentar el riesgo de colapso en terraplenes es un desafío central, lo que motiva la búsqueda continua de innovadoras alternativas tecnológicas. En este sentido, la estabilidad de terraplenes, esencial en numerosas infraestructuras, se ve amenazada por diversos factores, desde la expansión del suelo hasta la acumulación de agua. En este contexto, la aplicación de tecnologías avanzadas es un elemento clave para prever, vigilar y contrarrestar los riesgos asociados (Castillo, 2017).

Esta investigación expone un abanico de alternativas tecnológicas diseñadas para prevenir el colapso de terraplenes. Desde sistemas de instrumentación geotécnica que posibilitan una supervisión precisa hasta tácticas de fortalecimiento del suelo y soluciones de drenaje eficientes, estas innovaciones proporcionan respuestas específicas y estratégicas para asegurar la estabilidad a largo plazo de las estructuras geotécnicas. Este análisis detallado de las alternativas tecnológicas resalta la relevancia de la ingeniería moderna al crear soluciones sólidas y adaptables frente a los desafíos inherentes a la estabilidad del terreno (Castillo, 2017).

De esta forma, existen diversas alternativas tecnológicas para prevenir el colapso de terraplenes, cada una diseñada para abordar aspectos específicos de la estabilidad del suelo y las estructuras geotécnicas.

2.5.1.1 Sistemas de Instrumentación Geotécnica Avanzada

Los sistemas avanzados de instrumentación geotécnica implican una variedad de dispositivos y tecnologías diseñados para supervisar y medir diversos parámetros ligados con la conducta del suelo y las estructuras geotécnicas. Su importancia radica en su aplicación en proyectos de ingeniería civil, geotecnia y construcción, pues ofrecen información precisa que facilita la evaluación del rendimiento de las obras y respalda la toma de decisiones fundamentadas (Alva y Escalaya, 2011).

Por ello, se requiere la utilización de piezómetros, extensómetros e inclinómetros para monitorear constantemente las condiciones del suelo y detectar posibles deformaciones o cambios que podrían indicar un riesgo de colapso. Estos instrumentos proporcionan datos cruciales para evaluar el comportamiento del suelo y las estructuras en respuesta a cargas externas, cambios ambientales u otras influencias (Alva y Escalaya, 2011).

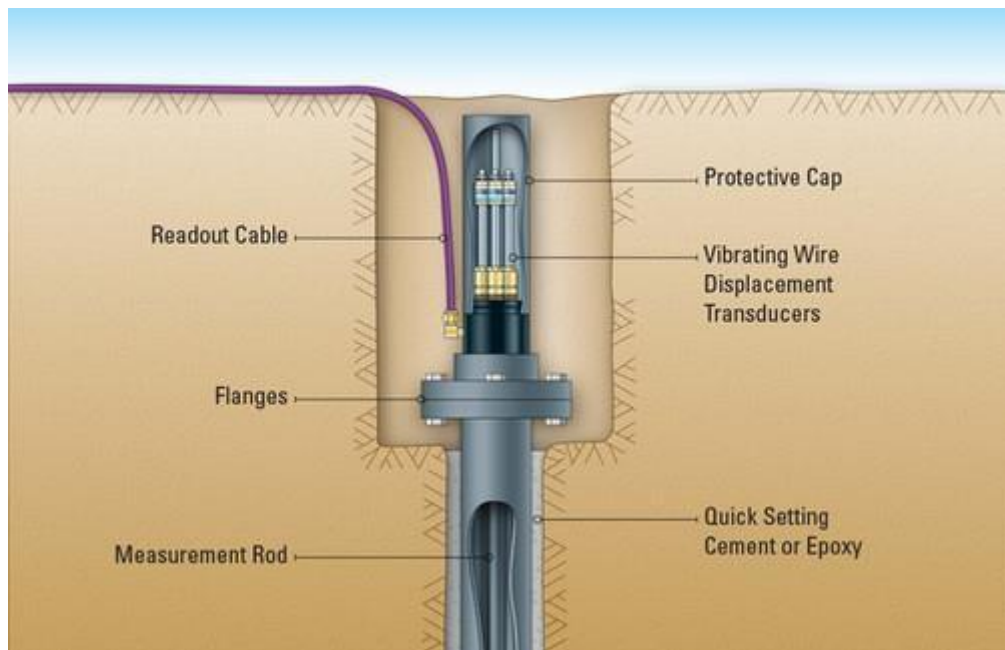


Figura 49. Extensómetro de Varilla de Puntos Múltiples utilizados para medir los movimientos del suelo.

Nota. Tomado de *Proyectos integrales de monitoreo automatizado con sensores ambientales en prácticamente cualquier aplicación*, por Telemetry, 2014, <https://n9.cl/givji>

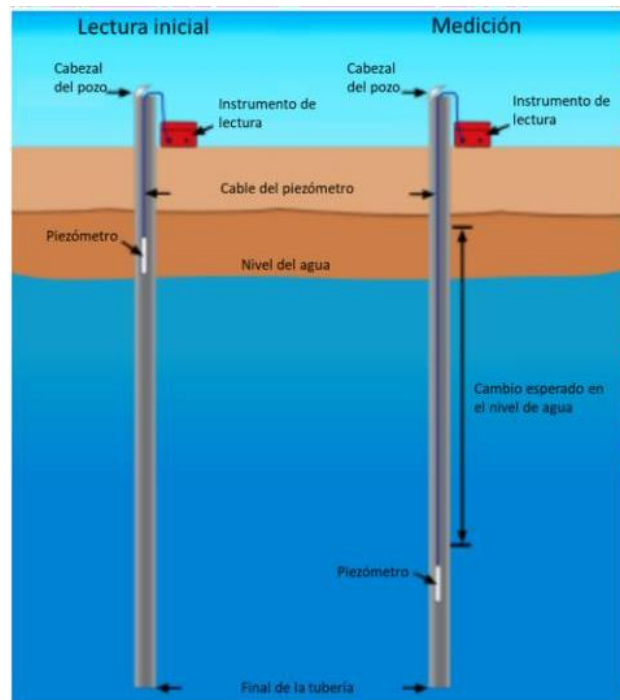


Figura 50. Monitoreo de la presión del agua en el suelo a través del piezómetro.

Nota. Tomado de *A piezometer method for measuring permeability of soil in situ below a water table*, por J. Luthin, 2016, Soil Science.

Geosintéticos y Reforzamiento del Suelo:

Una opción para gestionar los asentamientos diferenciales en áreas con suelos blandos o inestables es utilizar geosintéticos resistentes que puedan distribuir, homogéneamente, las cargas en el terreno mediante la planificación y la creación de una estructura de refuerzo para el suelo. como las geomallas de refuerzo (Cuenca, 2013).

El empleo de geosintéticos, como geotextiles y georedes, permiten reforzar el suelo y mejorar su capacidad de carga, lo que reduce el riesgo de colapso; estos geotextiles se pueden presentar de acuerdo con las necesidades del sitio o las características ambientales que se desean mejorar (Cuenca, 2013).

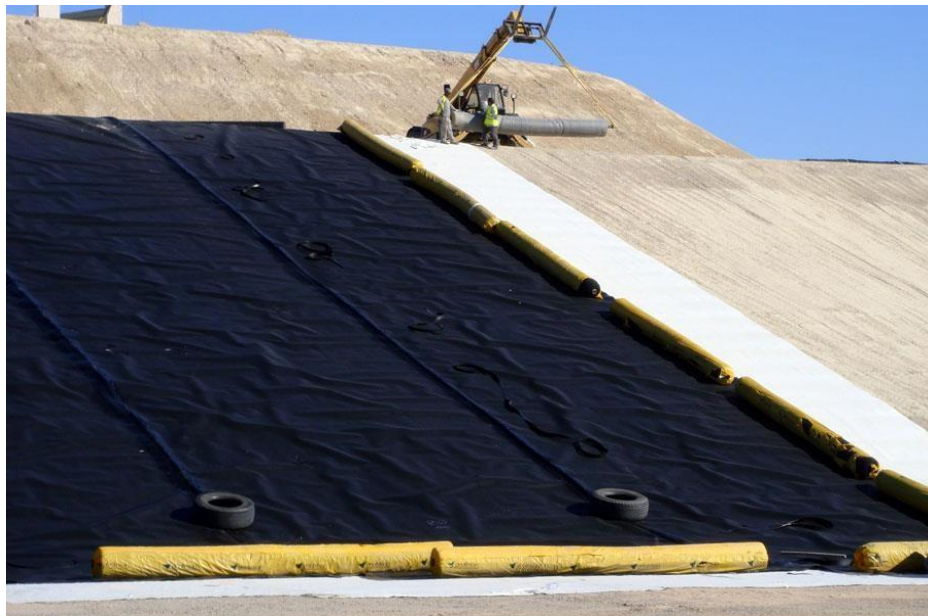


Figura 51. Geotextil sobre terraplén para el control de la erosión.

Nota. Tomado de *Geotextil Tejido HF*, por Pavco Wavin, 2022, <https://n9.cl/9voub>



Figura 52. Geotextil Tejido diseñado y fabricado con una estructura única que le permite ser utilizado para reforzar, separar y drenar.

Nota. Tomado de *Geotextil Tejido HF*, por Pavco Wavin, 2022, <https://n9.cl/9voub>

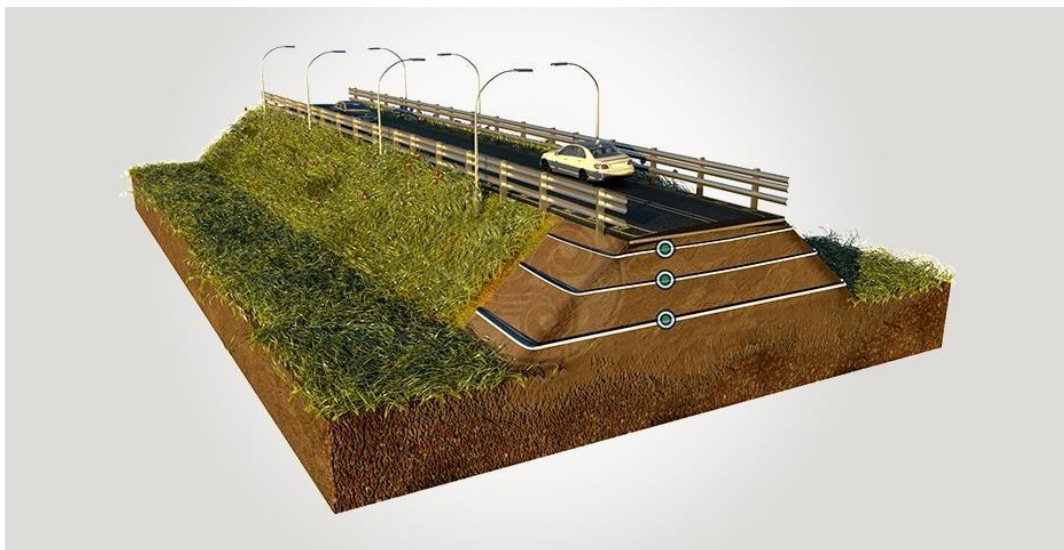


Figura 53. Implementación geomallas para el reforzamiento de terraplenes

Nota. Tomado de *Refuerzo de terraplenes y plataformas*, por Geomembranas y Geosintéticos, 2022, <https://www.geoygeo.com/aplicaciones/refuerzo-de-terraplenes-y-plataformas/>

Técnicas de Drenaje Eficientes:

La implementación de métodos de drenaje en terraplenes posibilita preservar la estabilidad del suelo y mitigar posibles complicaciones derivadas de la retención de agua, tales como la erosión, la disminución de la capacidad de resistencia del suelo y el riesgo de deslizamientos (Ponce, 2018).

Existen varios métodos de drenaje debido a los casos que el problema presenta, entre ellos, el drenaje superficial y drenaje subterráneo, el primero dentro y el segundo fuera del terraplén. Los drenajes superficiales permiten la evacuación rápida del agua de lluvia, para evitar su acumulación y reducir la presión sobre el terraplén; los drenajes subterráneos se refieren a la instalación de tuberías horizontales enterradas en el terraplén para recoger y transportar el agua subterránea hacia lugares de descarga adecuados (Ponce, 2018).

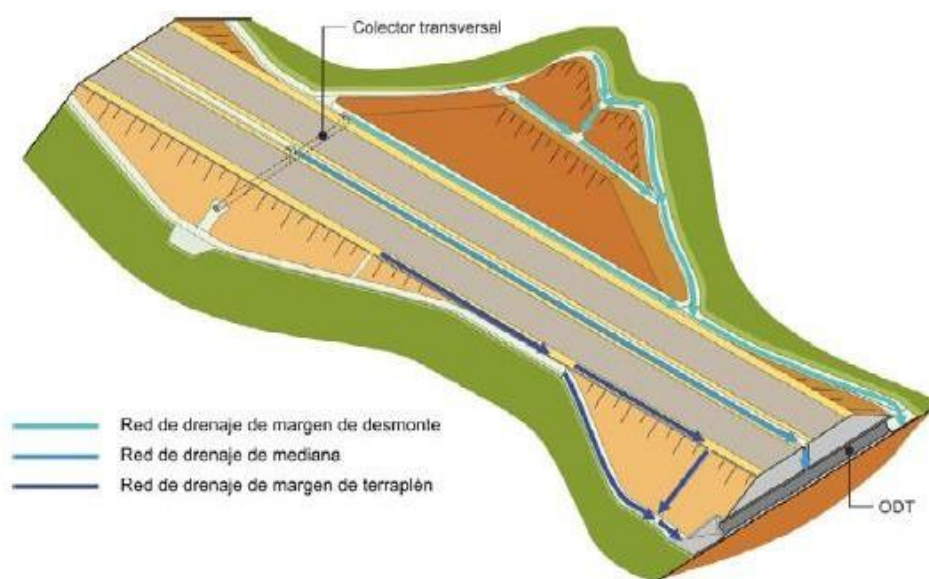


Figura 54. Red de drenaje superficial.

Nota. Tomado de *Drenaje de la plataforma y márgenes*, por C. Velázquez, 2016, [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.carreteros.org/normativa/drenaje/5_2ic2016/pdfs/3.pdf](http://www.carreteros.org/normativa/drenaje/5_2ic2016/pdfs/3.pdf)

En esta línea de ideas, los geodrenajes son otra alternativa eficiente, pues estos sistemas están diseñados para proporcionar una ruta para la evacuación del agua y aliviar las presiones

hidrostáticas que podrían afectar la estabilidad del terraplén, asimismo, se componen por materiales geotextiles y/o geomembranas que facilitan el flujo del agua a través de un terraplén. Su función principal es controlar y eliminar el exceso de agua, para evitar problemas como la saturación del suelo, la erosión y la pérdida de resistencia del mismo (Cuenca, 2013).

Cabe destacar que los geotextiles son materiales permeables que permiten que el agua fluya a través de ellos mientras evitan el paso de partículas finas de suelo y la obstrucción del sistema de drenaje. Por otro lado, las geomembranas son barreras impermeables que pueden incorporarse para prevenir la infiltración de agua en el terraplén, lo que es útil cuando se desea dirigir el flujo de agua de manera controlada (Cuenca, 2013).

El uso de geosintéticos para fortalecer terraplenes y plataformas posibilita la utilización de materiales disponibles en las proximidades de la obra o en sitio, para mejorar las características de carga y disminuir los desplazamientos en suelos de escasa resistencia debido a su limitada capacidad de soporte. Así, la implementación de sistemas de drenaje adecuados para controlar la acumulación de agua provoca que disminuya la saturación del suelo, que es una causa común de colapsos; esto puede incluir drenajes superficiales y subterráneos (Cuenca, 2013).

Estabilización Química del Suelo:

El uso de sustancias químicas para estabilizar terraplenes es una práctica común en la ingeniería civil, con el propósito de mejorar las características del suelo e incrementar su resistencia. Este método se aplica en proyectos de construcción de carreteras, ferrocarriles, presas y otras infraestructuras que demandan un terreno más sólido y estable; en terraplenes cumple con el objetivo de estabilizar el suelo y prevenir la expansión o contracción excesiva, lo que reduce los riesgos de colapso (Rivera, 2020).

Existen diversas sustancias químicas para estabilizar terraplenes, así, la elección depende de las características específicas del suelo y del proyecto en cuestión. Entre estos, se encuentran los aditivos químicos poliméricos que mejoran las propiedades del suelo al modificar su estructura; estos polímeros pueden actuar como agentes aglutinantes, lo que optimiza la cohesión del suelo y reduce la erosión (Rivera, 2020).

Estabilización con cal

La estabilización con cal es de las alternativas más comunes para la estabilización de suelos arcillosos, puesto que la cal es un agente de estabilización aplicable en su forma activa,

como la cal viva (óxido de calcio), y en su forma apagada, conocida como hidróxido de calcio. La cal reacciona con los elementos arcillosos presentes en el suelo, lo que mejora su cohesión y potencia su capacidad de carga (Rivera, 2020). Igualmente, actúan los agentes estabilizadores a base de silicato, los que reaccionan con los minerales del suelo para formar compuestos estables. Esta técnica puede ofrecer varias ventajas, como la mejora de la capacidad portante del suelo, la reducción de la susceptibilidad a la erosión y la mejora de la durabilidad de la estructura. Sin embargo, es preciso realizar un diseño adecuado y seguir las especificaciones técnicas para garantizar el éxito de la estabilización química del terraplén (Rivera, 2020).

Este procedimiento de estabilización química implica la combinación *in situ* de la sustancia estabilizadora con el suelo, seguido de la compactación para asegurar una distribución uniforme. Es crucial ejecutar pruebas de laboratorio y análisis geotécnicos para determinar la cantidad precisa de estabilizador químico a añadir y evaluar la eficacia de la técnica en el tipo particular de suelo (Rivera, 2020).



Figura 55. Utilización de cal para estabilizar suelos arcillosos.

Nota. Tomado de *Importancia de utilizar cal para estabilizar suelos arcillosos*, por J.

Álvarez, 2021, <https://n9.cl/0zqww>



Figura 56: Implementación de cal en suelos de alta plasticidad.

Nota. Tomado de *¿Qué es la estabilización de terrenos y por qué es importante?*, por M. Barros, 2013, <https://www.beyond.es/blog/estabilizacion-de-suelos/https://n9.cl/0zqww>

Estabilización con cemento

Es necesario realizar una evaluación del suelo mediante la obtención de muestras representativas y la realización de pruebas específicas para su identificación. Estas pruebas incluyen análisis granulométrico, determinación de plasticidad, evaluación de hinchamiento, medición de humedad natural y determinación del contenido de materia orgánica. Además, se pueden llevar a cabo pruebas adicionales para identificar componentes que podrían afectar el fraguado del cemento, como la presencia de sulfuros, sulfatos y cloruros (Yépez, 2011).

De acuerdo a las propiedades físicas y químicas del suelo, se selecciona el tipo de material conglomerante más adecuado para garantizar la capacidad de carga necesaria o la resistencia deseada. En ocasiones, se recurre a una estabilización combinada utilizando cemento y cal. Esta alternativa suele ser preferida cuando el suelo presenta altos niveles de humedad y necesita ser secado previamente, o cuando contiene partículas finas muy plásticas que no permiten alcanzar la resistencia requerida únicamente con la acción del cemento (Yépez, 2011).

Después de elegir el conglomerante adecuado, es necesario llevar a cabo pruebas para establecer la proporción correcta del mismo. Para cada cantidad de cemento, se realiza el

ensayo de Proctor Modificado para identificar la humedad óptima y la densidad máxima de compactación, con el objetivo de posteriormente calcular el índice CBR (Yépez, 2011).

Para establecer la cantidad adecuada de cemento, se realizan pruebas con varias series de muestras utilizando diferentes proporciones de cemento. Estas muestras se preparan con la humedad óptima y la densidad mínima requerida en el sitio de trabajo. Para calcular la cantidad exacta de cemento, se sugiere llevar a cabo un análisis de sensibilidad utilizando muestras compactadas a diversas densidades. Este proceso permite determinar la cantidad precisa de conglomerante que debe agregarse al suelo para asegurar que se cumplan las características necesarias (Yépez, 2011).



Figura 57: Estabilización de suelos con cemento.

Nota. Tomado de *Estabilización de suelos con cemento*, por V. Yépez, 2011, <https://victoryepes.blogs.upv.es/2021/02/22/estabilizacion-de-suelos-con-cemento/>

Modelado Numérico y Simulaciones:

El modelado numérico y las simulaciones son herramientas relevantes en la evaluación del comportamiento de terraplenes, en vista de que permiten analizar y prever el rendimiento del terraplén bajo diferentes condiciones y cargas, lo que brinda valiosa información para el diseño y para anticipar posibles escenarios de colapso (Rodríguez, 2018).

Frecuentemente, se utiliza el enfoque de elementos finitos para llevar a cabo simulaciones que estudien la respuesta estructural y geotécnica de un terraplén. Este método posibilita la subdivisión del modelo en componentes más pequeños, para lograr la realización

de análisis pormenorizados sobre tensiones, deformaciones y el comportamiento integral del suelo (Rodríguez, 2018).

Asimismo, el uso de modelado numérico posibilita la realización de evaluaciones de estabilidad, para la identificación de áreas potenciales de fallo y la valoración de las acciones correctivas necesarias. Este proceso es esencial para asegurar que el terraplén cumpla con los requisitos de seguridad y desempeño establecidos (Rodríguez, 2018).

Muros de Contención y Estructuras de Reforzamiento:

Los muros de contención y las estructuras de refuerzo tienen una función importante en la ingeniería civil al ofrecer estabilidad suplementaria y prevenir el deslizamiento de terraplenes. Estas medidas son fundamentales al asegurar la integridad y la seguridad de las estructuras en zonas con notables variaciones topográficas o en terrenos con desafíos geotécnicos (Pachacama y Lucero, 2012).

Una alternativa ideal para la estabilización de terraplenes implementando muros de contención es el módulo de contención, un elemento prefabricado de hormigón armado con una configuración en "L", donde la sección más extensa cumple la función de proporcionar soporte y presenta una textura extremadamente áspera en su superficie (Pachacama y Lucero, 2012). Este se instala sobre una superficie nivelada preparada para servir como base, estableciendo las conexiones adecuadas entre las piezas en sus lados, luego, se realiza el relleno por capas compactadas hasta alcanzar la altura necesaria. El talud resultante tendrá su base apoyada en la parte superior de la estructura de soporte (Pachacama y Lucero, 2012).

Así, opera de manera automática, por lo que, a medida que el terreno ejerce una mayor presión sobre él, se incrementa el rozamiento estabilizador con la base de soporte. Además, la estabilidad del conjunto se ve favorecida por su propio peso (Pachacama y Lucero, 2012).



Figura 58. Muro de contención de tierras.

Nota. Tomado de Muro de contención en suelo reforzado, por A. Curiel, 2007, *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica*, (5).

2.6 Sostenibilidad en los vertederos de desechos de construcción

Los vertederos destinados a la construcción sostenible constituyen una solución eficiente y respetuosa con el medio ambiente ante los desafíos relacionados con la gestión de desechos generados por proyectos constructivos. En contraposición a los vertederos convencionales, que suelen ser grandes depósitos de residuos, los vertederos de construcción sostenible pretenden integrar prácticas medioambientales y fomentar la reducción, la reutilización y el reciclaje de materiales de construcción (Allen, 2016).

Estos depósitos están concebidos para minimizar el impacto ambiental y fomentar la eficiencia en el uso de recursos con la gestión responsable de los desechos generados en proyectos de construcción y demolición. Uno de los objetivos principales es disminuir la cantidad de residuos enviados a vertederos convencionales, para evitar la acumulación de materiales que podrían ser recuperados e integrados en nuevos procesos constructivos (Allen, 2016).

Los depósitos de construcción sostenible promueven la clasificación y separación de materiales en el lugar de origen, para la posterior recuperación y reciclaje de elementos como madera, metal, hormigón y otros materiales reciclables. Además, se busca implementar

tecnologías avanzadas y prácticas de gestión eficientes para maximizar la valorización de los residuos y reducir la demanda de recursos naturales (Allen, 2016). En este sentido, al adoptar enfoques sostenibles en la gestión de desechos de construcción, estos vertederos contribuyen no solo a la preservación de recursos, sino a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la fabricación de nuevos materiales. En síntesis, los vertederos de construcción sostenible son parte integral de un modelo más amplio de economía circular, donde la reducción de residuos y la maximización de la reutilización y el reciclaje son clave para alcanzar un desarrollo sostenible a largo plazo (Allen, 2016).

2.6.1 Impacto Ambiental y Reducción de Emisiones

La adopción de un enfoque sostenible en la gestión de residuos de construcción conlleva consecuencias directas para la disminución del impacto ambiental y de emisiones de gases de efecto invernadero. Al prevenir la acumulación de desechos en depósitos tradicionales y promover prácticas de reutilización y reciclaje, se atenúan los efectos perjudiciales vinculados con la fabricación de nuevos materiales (Ramírez, 2012).



Figura 59. Residuos de demolición de vertederos no sostenible.

Nota. Tomado de *En CDMX, de 14 mil toneladas de residuos de construcción solo se procesan 6 mil cada día*, por M. Severiano, 2023, <https://n9.cl/hqduw>

La introducción de tecnologías avanzadas en la gestión de residuos, tales como sistemas automáticos de clasificación y procesos de reciclaje eficaces, optimiza la eficiencia energética. Por otro lado, la disminución de la energía requerida para la elaboración de nuevos materiales, con la reutilización y el reciclaje, disminuye las emisiones relacionadas con la generación de productos de construcción (Ramírez, 2012).

Al posibilitar la reutilización y el reciclaje de materiales, los depósitos de construcción sostenible hacen parte de un enfoque de economía circular. Este modelo tiene la finalidad de cerrar los ciclos de vida de productos y materiales, lo que reduce, al mínimo, el desperdicio y promueve la sostenibilidad a largo plazo (Ramírez, 2012).



Figura 60. Reciclaje de residuos de construcción y demolición aplicando medidas de reciclaje y sostenibilidad.

Nota. Tomado de *Recycling of construction debris as aggregate in the Mid-Atlantic Region*, por G. Robinson, 2004, U.S. Geological Survey.

Este cambio cultural contribuye a una mentalidad más sostenible que puede tener un impacto positivo en la reducción global de emisiones asociadas con la gestión de residuos de construcción, para lograr la transición hacia prácticas más sostenibles en el sector de la construcción (Ramírez, 2012).

2.6.2 Claves para la gestión de residuos en la construcción sostenible

La industria de la construcción destaca como uno de los mayores consumidores de recursos y generadores de residuos, por ello, existe la imperiosa necesidad de transitar hacia un modelo sostenible alineado con los principios de la economía circular.

De acuerdo con Márquez (2023), los desechos de la construcción y la demolición se pueden administrar conforme con las siguientes directrices:

2.6.3 *Elaboración de un estudio de gestión de residuos de construcción y demolición*

El generador de desechos de construcción y demolición debe realizar un análisis de gestión de residuos que incluya aspectos tales como los siguientes:

- Medidas para la prevención de residuos en la obra.
- Operaciones de reutilización, valoración y eliminación.
- Medidas de separación de residuos.
- Planos de instalaciones para almacenamiento, manejo y separación

1. Cálculo correcto de los materiales necesarios para la construcción.

Se debe realizar una estimación precisa de los materiales requeridos para evitar el desperdicio y la generación excesiva de residuos (Márquez, 2023).

2. Limpieza de herramientas y máquinas tras el uso.

Realizar la limpieza de maquinaria y herramientas después de su uso evita la necesidad de utilizar disolventes contaminantes (Márquez, 2023).

3. Almacenamiento adecuado

Es pertinente realizar un adecuado almacenamiento de los productos empleados en construcción, para reducir la generación de residuos, lo que implica prácticas como etiquetar los productos para indicar cuándo han sido abiertos y organizar su almacenamiento para prevenir roturas de envases. Así, es esencial resguardarlos de condiciones como el calor, la humedad o el frío, para evitar su deterioro (Márquez, 2023).

4. Hacer uso de materiales reciclados

Existe una cantidad de materiales que pueden ser reutilizados para las distintas actividades que se realizan en la obra, para evitar la acumulación de residuos y mitigar la necesidad de realizar pedidos de más materiales y afectar los entornos de donde provienen (Márquez, 2023).



Figura 61. Gestión de desperdicios y reciclaje de materiales de demolición.

Nota. Tomado de *Reciclaje y disminución de desperdicio inspiran iniciativas en la industria de la construcción*, por M. Morantes, 2020, <https://n9.cl/y85vp>

CAPÍTULO III. PROPUESTA METODOLÓGICA

3.1 Muestreo de campo

El material de las arcillas expansivas fue extraído de una zona en el kilómetro 18 de la vía San Antonio-La Margarita-Bahía de Caráquez en la provincia de Manabí a orillas de la carreta, cuyas arcillas expansivas pertenecen a las formaciones geológicas Tosagua y Onzole. Este material es abundante en dicha zona, debido a los antecedentes geológicos, por ello, constantemente existen problemas de deslizamientos de terraplenes, sobre todo, en épocas lluviosas.

Este material se identificó gracias a sus características físicas en las que se pueden observar fisuras en su superficie luego de que la humedad haya sido evaporada y el material queda expandido. Al palpar el material, se pudo confirmar que se trataba de arcillas expansivas, dado su textura esponjosa y partículas finas, así, al tener contacto con el agua, el material se expande de inmediato.



Figura 62. Talud con arcillas expansivas.

Nota. Elaboración propia



Figura 63. Talud de carretera con arcillas expansivas.

Nota. Elaboración propia



Figura 64. Textura esponjosa y partículas muy finas del material.

Nota. Elaboración propia

Al confirmar la presencia de arcillas expansivas, se tomaron las muestras del material ubicando una cantidad del mismo en sacos para ejecutar un análisis en el laboratorio de suelos.



Figura 65. Extracción del material para análisis en laboratorio.

Nota. Elaboración propia



Figura 66. Extracción del material para análisis en laboratorio.

Nota. Elaboración propia

3.2 Muestreo de escombros de demolición

Para la toma de esta muestra, se accedió a una obra de construcción donde había residuos de bloques de arcilla, restos de hormigón, adoquines, piezas de porcelanato y tejas de arcilla. Este material se trituró manualmente para obtener fragmentos más pequeños, con el fin de triturarlos con un rodillo liso con mayor facilidad y obtener un material fino.



Figura 67. Acumulación de residuos de materiales de construcción para trituración.

Nota. Elaboración propia



Figura 68. Residuos de materiales de construcción.

Nota. Elaboración propia



Figura 69. Trituración de desechos de materiales de construcción utilizando rodillo liso.

Nota. Elaboración propia



Figura 70. Trituración de desechos de materiales de construcción.

Nota. Elaboración propia

En este orden de ideas, una vez triturados los de desechos de materiales de construcción, se ubicaron en sacos para ser analizado en el laboratorio.



Figura 71. Desechos de materiales de construcción triturados.

Nota. Elaboración propia

3.3 Mezcla 70 % arcilla y 30 % desechos de construcción triturados

Para la reducción de la plasticidad de las arcillas expansivas con la adición de desechos de construcción triturados, se utilizó la proporción 70-30 (70% de arcillas expansivas y 30% de desechos de construcción triturados, propuesto por (Silva, Sousa, Pedrozo, & Oliveira, 2023).

Inicialmente, se colocó la arcilla expansiva en un horno durante 24 horas para secarla totalmente y observar el material en estado seco, pues, al tomarlo de su estado natural, este estaba saturado. De esta manera, se evidencia el comportamiento del material al interactuar con el agua, el que produce una expansión en sus partículas inmediatamente, con lo que se comprobó su alto grado de expansividad y plasticidad.



Figura 72. Muestra de arcilla expansiva siendo colocada en horno.

Nota. Elaboración propia



Figura 73. Arcillas expansivas en horno para eliminar la humedad en sus partículas.

Nota. Elaboración propia

Al observar la expansividad y la textura de la muestra seca en contacto con el agua, se procedió a secar durante 24 horas el resto de material para empezar con las pruebas.



Figura 74. Secado de arcillas expansivas durante 24 horas.

Nota. Elaboración propia



Figura 75. Arcillas expansivas siendo tendidas para su secado.

Nota. Elaboración propia

Para el material de escombros triturados se utilizó el tamiz No. 4 para separar los restos de mayor tamaño y proceder a realizar la mezcla con la arcilla.



Figura 76. Muestra del material de escombros triturado.

Nota. Elaboración propia



Figura 77. Proceso de mezcla 70 % arcilla 30 % escombros triturados.

Nota. Elaboración propia



Figura 78. Mezcla 70% arcilla 30% escombros triturados.

Nota. Elaboración propia

3.4 Resultados del análisis de laboratorio

3.4.1 Granulometría, límites de Atterberg y CBR de la arcilla expansiva

3.4.1.1 Granulometría



Figura 79. Tamizado de material de arcillas expansivas por el tamiz 40.

Nota. Elaboración propia

TAMIZ		RETENIDO PARCIAL (g)	RETENIDO PARCIAL (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	PASANTE ACUMULADO (%)
ASTM	mm				
4"	100,0	0,0	0,0	0,0	100,0
3"	75,0	0,0	0,0	0,0	100,0
2"	50,8	0,0	0,0	0,0	100,0
1 ½"	38,1	0,0	0,0	0,0	100,0
1"	25,4	0,0	0,0	0,0	100,0
¾"	19,05	0,0	0,0	0,0	100,0
⅜"	9,53	0,0	0,0	0,0	100,0
No. 4	4,75	2,7	0,2	0,2	99,8
No. 10	2,00	7,2	0,5	0,7	99,3
No.40	0,43	77,0	5,7	6,4	93,6
No. 200	0,08	99,0	7,3	13,7	86,3
TOTAL MUESTRA		1353,0 gr.			

Figura 80. Análisis granulométrico de las arcillas expansivas.

Nota. Elaboración propia

3.4.1.2 Límites de Atterberg

LÍMITES	
LÍMITE LÍQUIDO :	72
LÍMITE PLÁSTICO :	45
ÍNDICE DE PLASTICIDAD :	27

Figura 81. Resultados índices de plasticidad de las arcillas expansivas

Nota. Elaboración propia

CLASIFICACIÓN	
SUCS (ASTM D-2487) :	MH
AASHTO (M 145) :	A-7-5

Figura 82. Clasificación SUCS y AASHTO.

Nota. Elaboración propia

3.4.1.3 CBR de arcillas expansivas

Ensayo de compactación Proctor

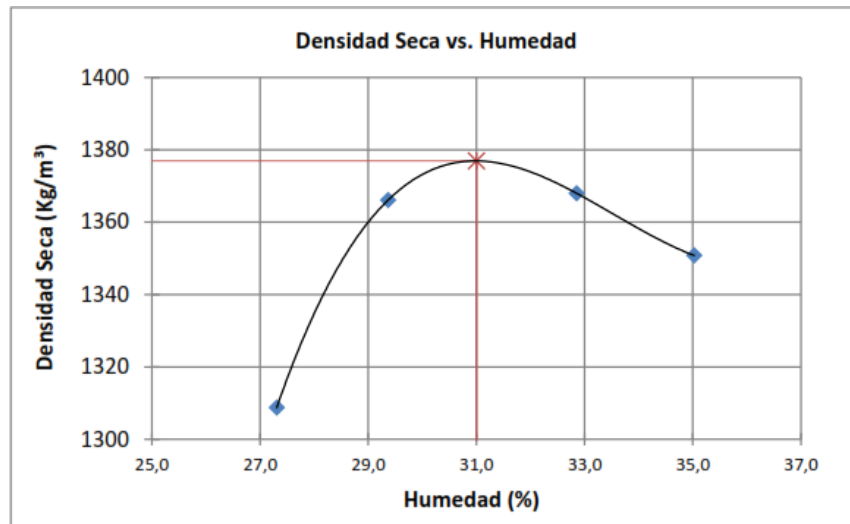


Figura 83. Gráfica de Densidad seca vs Humedad de la arcilla.

Nota. Elaboración propia

HUMEDAD ÓPTIMA
31,0 %
DENSIDAD MÁXIMA
1377 Kg/m ³

Figura 84. Humedad óptima

Datos del esponjamiento

	MOLDE No. 56			MOLDE No. 24			MOLDE No. 67		
	Lectura Indicador	Esponjamiento		Lectura Indicador	Esponjamiento		Lectura Indicador	Esponjamiento	
		Pulg.	%		Pulg.	%		Pulg.	%
Dia 1	0+311	0,311	6,91	0+278	0,278	6,17	0+210	0,210	4,67
Dia 2	0+314	0,314	6,98	0+290	0,290	6,44	0+232	0,232	5,16
Dia 3	0+315	0,315	7,00	0+307	0,307	6,81	0+264	0,264	5,87
Dia 4	0+315	0,315	7,00	0+323	0,323	7,17	0+296	0,296	6,58

Figura 85. Datos del esponjamiento de las arcillas expansivas.

Nota. Elaboración propia

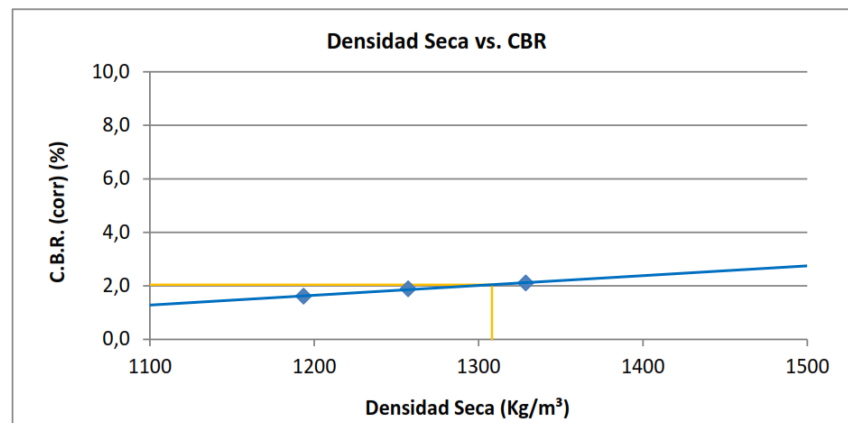


Figura 86. Resultados del CBR de las arcillas.

Nota. Elaboración propia

C.B.R. (95%) = 2 %

Figura 87. Resultado del C.B.R de la arcilla expansiva.

Nota. Elaboración propia

3.4.2 Ensayos de granulometría, límites de Atterberg y CBR de la mezcla

3.4.2.1 Granulometría

TAMIZ		RETENIDO PARCIAL (g)	RETENIDO PARCIAL (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	PASANTE ACUMULADO (%)
ASTM	mm				
4"	100,0	0,0	0,0	0,0	100,0
3"	75,0	0,0	0,0	0,0	100,0
2"	50,8	0,0	0,0	0,0	100,0
1 ½"	38,1	318,2	5,8	5,8	94,2
1"	25,4	407,3	7,4	13,2	86,8
¾"	19,05	448,3	8,2	21,4	78,6
⅜"	9,53	969,0	17,7	39,1	60,9
No. 4	4,75	657,8	12,0	51,1	48,9
No. 10	2,00	447,1	8,2	59,2	40,8
No.40	0,43	955,9	17,4	76,6	23,4
No. 200	0,08	781,6	14,2	90,9	9,1
TOTAL MUESTRA		5485,7 gr.			

Figura 88. Análisis granulométrico del material de demolición.

Nota. Elaboración propia

3.4.3 Límites de Atterberg



Figura 89. Registro de datos de muestra.

Nota. Elaboración propia

LÍMITES	
LÍMITE LÍQUIDO :	53
LÍMITE PLÁSTICO :	35
ÍNDICE DE PLASTICIDAD :	18

Figura 90. Resultados índices de plasticidad de la mezcla.

Nota. Elaboración propia

3.4.4 CBR de la mezcla

Ensayo de compactación Proctor



Figura 91. Compactación de prueba de Proctor de la mezcla.

Nota. Elaboración propia



Figura 92. Proceso de ensayo de compactación.

Nota. Elaboración propia

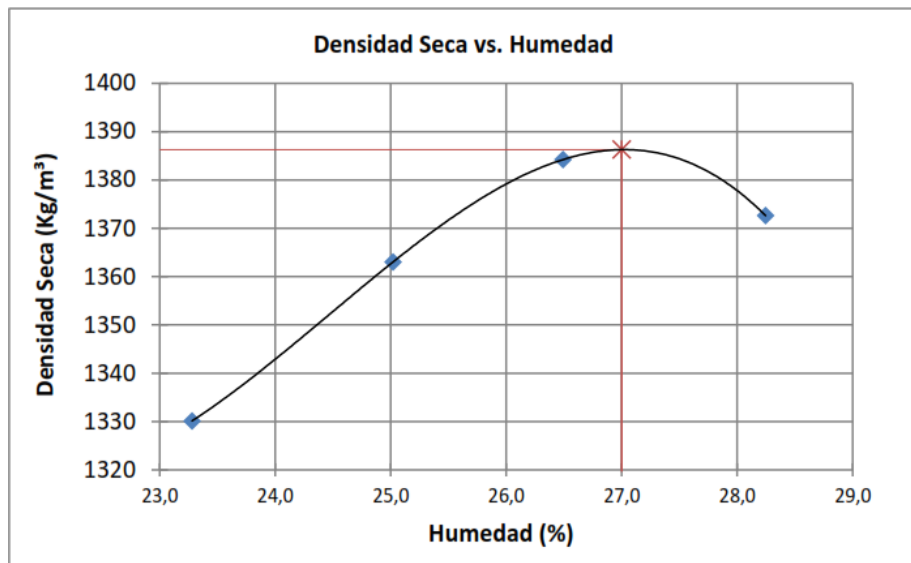


Figura 93. Gráfica de densidad seca vs. humedad de la mezcla.

Nota. Elaboración propia

HUMEDAD ÓPTIMA
27,0 %
DENSIDAD MÁXIMA
1386 Kg/m ³

Figura 94. Resultados del ensayo de Proctor.

Nota. Elaboración propia

Datos del hinchamiento

	MOLDE No. 20			MOLDE No. 4			MOLDE No. 1		
	Lectura Indicador	Esponjamiento		Lectura Indicador	Esponjamiento		Lectura Indicador	Esponjamiento	
		Pulg.	%		Pulg.	%		Pulg.	%
Dia 1	0+134	0,134	2,98	0+145	0,145	3,21	0+121	0,121	2,69
Dia 2	0+154	0,154	3,42	0+161	0,161	3,58	0+134	0,134	2,98
Dia 3	0+177	0,177	3,93	0+182	0,182	4,04	0+153	0,153	3,40
Dia 4	0+190	0,190	4,22	0+190	0,190	4,21	0+155	0,155	3,44

Figura 95. Datos del hinchamiento de la mezcla.

Nota. Elaboración propia

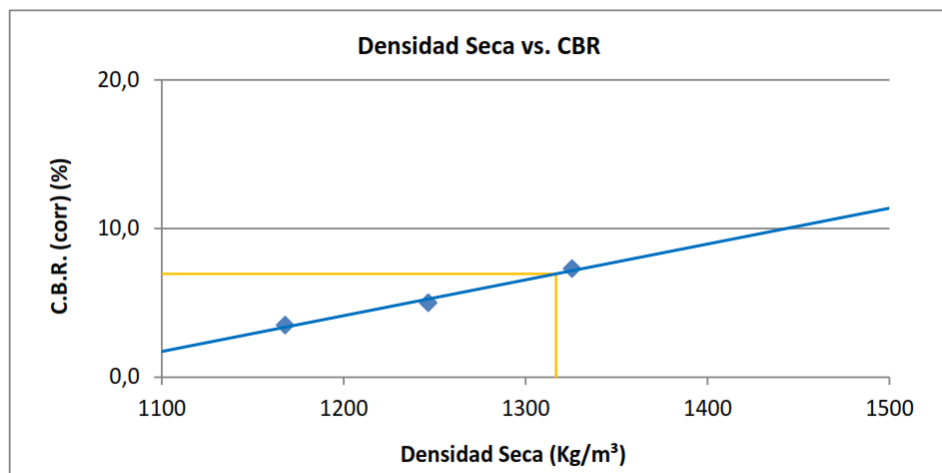


Figura 96. Resultados del CBR de la mezcla.

Nota. Elaboración propia

C.B.R. (95%) = 7 %

Figura 97. Resultado CBR de la mezcla.

Nota. Elaboración propia

3.5 Proceso constructivo para la ejecución de la trituración, molido y mezclado del material reciclado con las arcillas expansivas

En este apartado, se explica paso a paso el procedimiento constructivo, de forma gráfica y descriptiva, de la trituración, el molido y el mezclado del material extraído de residuos de demoliciones o escombros con las arcillas expansivas halladas en los terraplenes susceptibles a deslizamientos o deslizados, así como la operación de las maquinarias que participan en este procedimiento.

Con una excavadora con triturador ubicada en el botadero de escombros, se toma el material de residuos de construcción y se tritura; este material, con una cargadora frontal o la propia excavadora, se ubica en una volqueta y se traslada a una zona cercan del deslizamiento a reparar.



Figura 98. Triturado de material de escombros con excavadora con cuchara trituradora situada en el botadero.

Nota. Tomado de *Home*, por MB Crusher, 2020, <https://www.mbcrusher.com/es/es/>



Figura 99. Traslado de material de demolición en plaza de trabajo provisional

En la zona afectada, se procede a retirar el material deslizado y se ubica en una superficie horizontal, la que es una plaza de trabajo provisional cercana al terraplén a reparar. Este material deslizado se sitúa en la superficie con un espesor de 70 cm, así, el material extraído del botadero se coloca sobre el material del terraplén con un espesor de 30 cm, obteniendo la dosificación requerida de 70% y 30% de la arcilla y el material reciclado en un metro de material total. De esta manera, se puede medir un aproximado de las proporciones de las capas de material que se van a mezclar, para cumplir con la dosificación requerida.

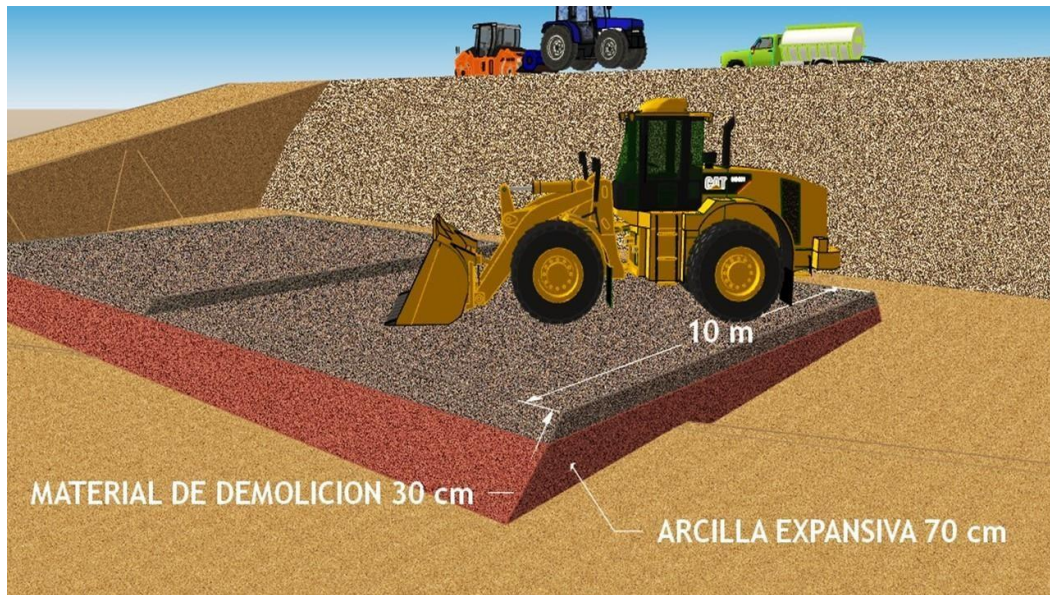


Figura 100. Proceso de colocación de material de demolición y material deslizado en plaza de trabajo definitiva

La cargadora frontal mezcla ambos materiales formando uno solo, así, posteriormente, este es ubicado en la plaza de trabajo definitiva.



Figura 101: Tendido del material de la mezcla en plaza de trabajo definitiva con cargadora frontal



Figura 102. Ejecución de mezclado en plaza de trabajo provisional

Ya en la plaza de trabajo definitiva, sobre este material, alternadamente, durante cuatro ocasiones, el rodillo pata de cabra y la rastra agrícola ejecutan dos pasadas, completando un total de ocho pasadas cada uno, para terminar de triturar el material grueso del deslizamiento y de los escombros.



Figura 103: Trituración del rodillo pata de cabra



Figura 104. Uso de la rastra agrícola para elevar el material grueso para ser triturado



Figura 105. Triturado de la mezcla con rodillo pata de cabra

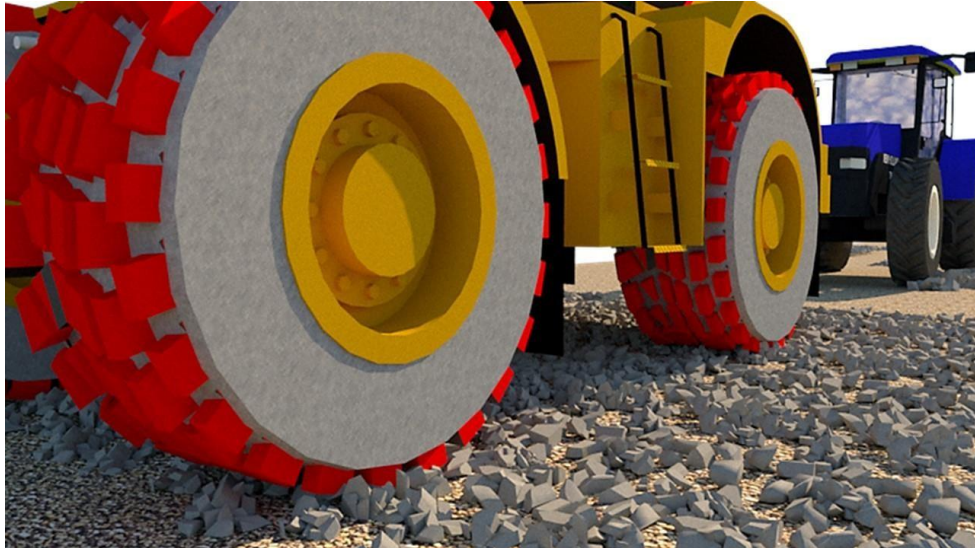


Figura 106: Rodillo pata de cabra



Figura 107: Tractor agrícola con rastra

Este procedimiento resulta en una nueva granulometría, con la obtención de un material más fino; luego de ello, pasa el rotavator sobre la mezcla y pulveriza el material, lo que evita que existan zonas donde se haya acumulado, en mayor volumen, un solo material, de esta manera, se obtiene una mezcla homogénea.



Figura 108. Pulverizado del material con el uso de rotavator

Finalmente, concluida esta operación, se agrega agua con tanquero y se compacta definitivamente. A través de la mezcla realizada, se produce una reducción de la plasticidad del material del terraplén construido sobre arcillas expansivas, lo que mejora sus propiedades mecánicas, así, el suelo propenso a deslizamientos ha aumentado su capacidad de soporte con una mezcla proporcionada de un material reciclado y equipo convencional, lo que es un económico mejoramiento de suelos comparado con metodologías que involucran retirar el material deslizado y cambiarlo por material de canteras, donde el transporte se convierte en un fuerte rubro económico a considerar.



Figura 109: Hidratación del material con tanquero para correcta compactación

En las figuras 110 y 111 se puede observar el equipo utilizado para el procedimiento de reforzamiento de terraplenes propuesto realizando las actividades en los pasos anteriormente descritos.



Figura 110: Equipo de trituración y compactación, vista desde la plaza de trabajo provisional



Figura 111: Equipo de trituración y compactación, vista desde la plaza de trabajo definitiva

3.6 Análisis de los resultados obtenidos

La Figura 79 muestra los resultados del IP de 27 y un LL de 72 provenientes de las arcillas expansivas extraídas del kilómetro 18 de la vía San Antonio-La Margarita-Bahía de Caráquez en la provincia de Manabí, lo que demuestra una alta plasticidad y una mayor compresibilidad del material, según el sistema SUCS, se clasifica como un limo de alta plasticidad (MH). De este modo, los resultados de la prueba de CBR de las arcillas arrojaron un 2 %, lo que evidencia una pobre capacidad de soporte y un material propenso a deformaciones.

Asimismo, entre las arcillas expansivas y el material de escombros triturados con una dosificación del 70 % y 30 %, respectivamente, se obtuvo un considerable decremento del límite líquido (LL) del material y, por lo tanto, una reducción en su IP, el que de 27 redujo a 18, lo que disminuyó su compresibilidad y corrigió el potencial de expansión de las arcillas expansivas. La prueba de CBR de la mezcla dio como resultado un aumento de 2 % a 7 %, con una mejoría en la capacidad de soporte y las propiedades de las arcillas expansivas pasando a ser un material de muy mala calidad para la construcción de terraplenes a un material con características aproximadas a las de a un suelo de mejoramiento, de tal manera, se cumple el objetivo del reforzamiento del terraplén a través de la alternativa propuesta.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente estudio ha explorado el potencial de mejora de las propiedades mecánicas de las arcillas expansivas provenientes de la zona de la vía San Antonio-La Margarita-Bahía de Caráquez mediante la incorporación de materiales reciclados. A través de los ensayos de laboratorio y análisis detallados, se logró demostrar que al incluir materiales de construcción reciclados provenientes de los botaderos, no solo disminuye las características de expansión y contracción volumétrica de las arcillas expansivas, sino que se observó que se incrementa la capacidad de soporte y, por ende, mayor resistencia a los deslizamientos.

Los resultados obtenidos a través de las pruebas de caracterización, granulometría y CBR, revelan que la adición de material reciclado de escombros al material expansivo extraído de un terraplén, con una proporción del 70% de arcillas expansivas y 30% del material de construcción reciclado, ha cumplido con el propósito de mejorar las propiedades del suelo y poder ser una óptima propuesta para el reforzamiento de terraplenes. Al usar materiales reciclados que provengan de botaderos de escombros por terremotos o residuos de demolición, muestra una alternativa económica y sostenible en comparación a los métodos de mejoramiento de suelos más comunes.

Mediante una propuesta gráfica se esquematizó el proceso constructivo donde se detallan los equipos y herramientas que deberán ser utilizadas para la reconstrucción de los terraplenes deslizados, donde se describen las actividades para la ejecución de la misma y, de esta manera, obtener una mezcla óptima para poder reforzar un terraplén en riesgo de deslizamiento o ya deslizado.

Se espera que esta novedad científica sea un punto de partida para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en el diseño y construcción de infraestructuras, promoviendo la sostenibilidad y la eficiencia en el uso de recursos en el ámbito de la ingeniería civil.

Se sugiere la realización de análisis económicos detallados para comparar los costos y beneficios de utilizar material reciclado en comparación con métodos tradicionales de reforzamiento de terraplenes. Esto podría incluir consideraciones sobre la disponibilidad de materiales, costos de transporte, y costos de mantenimiento a largo plazo.

Se recomienda la realización de estudios a largo plazo para evaluar el comportamiento de los terraplenes reforzados con material reciclado. Esto ayudará a entender mejor su durabilidad y resistencia a condiciones ambientales cambiantes.

REFERENCIAS

- Agroscorpio. (2023). *Rotavator tiller rotativo 210cm sicma*.
<https://agroscopio.com/producto/rotavator-rd-210/>
- Aguilar, R: (2013). *Análisis Sísmico por Desempeño* [Universidad de Fuerzas Armadas ESPE].
https://www.researchgate.net/publication/280627456_Analisis_Sismico_por_Desempeno
- Alamy. (14 de Marzo de 2022). *Desperdicio de material de construcción Fotografías e imágenes editoriales*. <https://n9.cl/xfvum>
- Alberti, J. (2006). *técnicas de mitigación para el control de deslizamientos en taludes y su aplicación a un caso específico* [Universidad del Salvador]. <https://n9.cl/dz5au>
- Aldana, J., & Serpell, A. (16 de Marzo de 2020). *Temas y tendencias sobre residuos de construcción y demolición: un meta-análisis*. <https://n9.cl/56fgk>
- Allen, A. (2016). *Containment landfills: the myth of sustainability*. University College Cork.
- Allen, R. (2003). The potential for earthquake early warning in southern California. *Science*, 2, 786-9. 10.1126/science.1080912.
- Alva, J., & Escalaya, M. (2011). *Instrumentación Geotécnica de la Presa Pillones* [Universidad Nacional de Ingeniería]. <https://n9.cl/7ncy8c>
- Álvarez, J. (2021). *Importancia de utilizar cal para estabilizar suelos arcillosos*. Horcalsa:
<https://n9.cl/0zqww>
- Álvarez, R. (2012). *Comportamiento y simulación de terraplén carretero construido con arcillas expansivas*. Gobierno de Mexico.
- Aranguren, E. (2015). *Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado* [Universidad Politécnica de Madrid]. <https://n9.cl/b82tc>
- Auvinet, G., & Sánchez, J. (2020). *Diseño de terraplenes ligeros para control de asentamientos*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Baiocchi, V. (2022). Damage Properties of the Block-Stone Embankment in the Qinghai–Tibet Highway Using Ground-Penetrating Radar Imagery. *Remote Sens*, 14(12), 2950.
<https://doi.org/10.3390/rs14122950>

- Baldock, J. (1982). *Geología del Ecuador: boletín de la explicación del mapa geológico de la República del Ecuador, escala 1:1,000.000*. Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos, Dirección General de Geología y Minas.
- Bowles, J. (1996). *Foundation Analysis and Design*. McGraw-Hill.
- Brady, N. (2016). *The Nature and Properties of Soils*. Pearson.
- Broseta, M. (2016). *Perforación a rotación y recuperación de testigo*. <https://wellpoint.es/perforacion-a-rotacion-y-recuperacion-de-testigo/>
- Buchanan, G. (2003). *Sustainable agriculture and the environment in the humid tropics*. National Academy Press.
- Buitrón, S.K., & Enríquez, A.J. (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>
- Cárdenas, L. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica (Cuarta edición)*. Cengage Learning.
- Castillo, A. P. (2017). *Sistemas tecnológicos alternativos para la protección vegetal en taludes* [Universidad Nacional de Colombia]. <https://n9.cl/gy53f0>
- Castro, A. (2010). *Técnicas de Protección de Taludes Viales Utilizadas en la Zona Central de Chile*. Universidad de Chile.
- Castro, J. (25 de Enero de 2018). *La capacidad de campo de un suelo: técnicas para su medición*. <https://n9.cl/uw576b>
- Chávez, M. (2008). *Evaluación ingeniero-geológica del deterioro de las rocas en la provincia de Manabí, Ecuador*. Escuela Politécnica del Litoral.
- Chucos, A. (2020). *Impacto ambiental del manejo de residuos sólidos del botadero "El Porvenir" - El Tambo* [Universidad Continental]. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/8794>
- Cortéz, C. (2012). *Límites de Atterberg*. Pearson .
- Cuenca, J. (2013). Los geosintéticos de refuerzo bajo terraplenes sobre suelos blandos. *Ingeopres*, 117, 44-46. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=667664>

- Curiel, A. (2007). Muro de contención en suelo reforzado. *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica*, (5), 97-111. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3058753>
- De Souza, M., & Soares, M. E. (2013). *Diseño y Desempeño de Terraplenes en Suelos Muy Blandos*. CRC Press.
- Diario El Universo . (11 de Marzo de 2021). *En Manabí y El Oro cuantifican los daños por fuerte estación invernal*. <https://n9.cl/ia6uk>
- Diario El Universo. (2003). *Transportistas piden arreglo de las carreteras de Manabí*. <https://n9.cl/qo8ro>
- Diario El Universo. (2014). *Sector de la construcción tuvo el mayor repunte económico de los últimos 9 años*. Guayaquil. <https://n9.cl/m7yin>
- Díaz, J. S. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Ingeniería de Suelos Ltda.
- El Diario Ecuador. (2019). *Laderas quedan sin protección*. <https://www.eldiario.ec/noticias-manabi-ecuador/508474-laderas-quedan-sin-proteccion/>
- El Diario Ecuador. (5 de Julio de 2016). *Escombrera de La Solita ya ha sido ocupada en un 35 por ciento*. <https://n9.cl/isv45>
- El Expreso. (14 de Julio de 2022). *El sismo registrado en Guayas tiene similitudes con el terremoto del 16 de abril del 2016*. <https://suscripcion.expreso.ec/id/login?loginwall=true>
- Fernández-Gutiérrez, J. D., López-Valero, J. D., & Hürlimann, M. (2022). *Aplicación de clasificaciones para la evaluación del riesgo en la gestión de la explotación de corredores viales. Experiencias, adaptaciones y propuestas. In XI Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica: la geotecnia en apoyo de la seguridad*. <https://n9.cl/3gmdh>
- García, D.A., & Cabana, M. (2014). *Propiedades de retención de humedad de arcillas sobreconsolidadas por desecación del occidente de la sabana de Bogotá* [Universidad Santo Tomas]. <https://n9.cl/hcekg>
- Garnica, P., & Ramírez, J. A. (2014). *Gestión de terraplenes y riesgos ante la inestabilidad de terraplenes*. Instituto Mexicano de Transporte.

- Geomembranas y Geosintéticos. (2022). *Refuerzo de terraplenes y plataformas*.
<https://www.geoygeo.com/aplicaciones/refuerzo-de-terraplenes-y-plataformas/>
- Green, R. (18 de Agosto de 2019). *¿Cuál es la magnitud más pequeña de un terremoto que debe considerarse al evaluar el peligro de licuefacción?* <https://n9.cl/s8d5qx>
- Guzmán, J. (2023). *Arcillas expansivas y suelos expansivos*. Universidad Complutense de Madrid.
- Hernández, W. (2021). *Comportamiento geotécnico de la cimentación del puente carrozable Taulis-El Ingenio, los terraplenes y los muros de contención, distrito Calquis, provincia de San Miguel, departamento Cajamarca* [Universidad Nacional de Cajamarca].
<https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/4509?show=full>
- Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional. (2015). *Catálogo de sismos del Ecuador*. <https://www.igepn.edu.ec/catalogos-sismicos>
- Instituto Geofísico del Ecuador. (23 de Agosto de 2022). *Enjambre sísmico frente a las costas de Jama*. <https://n9.cl/wywx98>
- John Deere. (2023). *Rastra 680*. <https://n9.cl/v2mp6>
- Jones, L. (1996). *Swarms of small earthquakes*. Science.
- Juárez, E. (2005). *Mecánica de suelos*. Limusa.
- Keeling, J. (2013). *Fundamental and applied research on clay minerals: From climate and environment to nanotechnology*. Elsevier.
- Kong, L. J. (2020). *Evaluación del impacto ambiental de la eliminación de residuos de la construcción basada en análisis de conjuntos difusos*. Universidad de Minería y Tecnología de China.
- Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall.
- Luthin, J. (2016). *A piezometer method for measuring permeability of soil in situ below a water table*. Soil Science.
- Márquez, C. (2023). *Claves para la gestión de residuos en la construcción sostenible*.
<https://n9.cl/0qxc4>
- Márquez, C. (4 de Noviembre de 2022). *El sector de la construcción incorpora prácticas sostenibles en beneficio del cuidado ambiental*. <https://n9.cl/mdbn6>

- MB Crusher. (19 de Junio de 2020). *Home*. <https://www.mbcruisher.com/es/es/>
- Melentijevic, S., & Morilla, P. (2014). Estabilidad de terraplenes sobre columnas de suelo-cemento. *Revista Digital Del Cedex*, (175). <https://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/2084>
- Mena, P. (18 de Abril de 2016). *El drama de Pedernales, el pueblo más golpeado por el terremoto en Ecuador*. <https://n9.cl/8502u4>
- Mezarino, R. (2022). *Forma de suelos alterados e inalterados*. Universidad Agraria de la Selva.
- Michaud, F., Collot, J., & Pazmiño, N. (2009). *El karst submarino de mega depresiones circulares de la Cordillera de Carnegie (Ecuador): posible origen por disolución submarina*. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers11-11/010051351.pdf
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2014). *Fichas técnicas de puntos críticos mpr Manabí*. <https://n9.cl/tm46dx>
- Mitchell, J. (1993). *Fundamentals of Soil Behavior (2nd ed.)*. Wiley; Geo-Institute of ASCE.
- Mora, R. (13 de octubre de 2016). *San José es muy susceptible a deslizamientos* [Universidad de Costa Rica]. <https://n9.cl/d1irm>
- Morantes, M. (2020). *Reciclaje y disminución de desperdicio inspiran iniciativas en la industria de la construcción*. <https://n9.cl/y85vp>
- MTOP. (2002). *Especificaciones generales para la construcción para la construcción de caminos y puentes de caminos y puentes*. Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones.
- Nájar, A. (4 de Octubre de 2017). *Las razones por las que colapsaron tantos edificios en Ciudad de México (y no todas son el terremoto)*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-41481250>
- Navas, G. (2016). *Impermeabilizar en suelos expansivos*. Special Nets.
- Pachacama, E., & Lucero, F. (2012). *Análisis y diseño de muros de contención* [Universidad Central del Ecuador]. <https://n9.cl/s2sij>
- Pavco Wavin. (2022). *Geotextil Tejido HF*. <https://n9.cl/9voub>

- Paz, N., & Morante, F. (2021). *Análisis geomorfológico y puesta en valor como geositios de acantilados de playas representativas de Manabí (Ecuador)* [Escuela Superior Politécnica Del Litoral]. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/55524>
- Perdomo, I. (21 de Abril de 2010). *Construcción De Terraplén*. <https://construcciondeterraplen.blogspot.com/2010/04/en-ingenieria-civil-se-denomina.html>
- Pérez, R., & Salazar, M.V. (2016). *Correlación entre el ensayo de CBR y el ensayo del próctor para determinar la resistencia del suelo de la parroquia Ambatillo Alto en el sector de San Pedro* [Universidad Técnica de Ambato]. <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/23637>
- Plaza, A. (2017). *Control de taludes de Marienberg: solución eficiente para la protección de taludes*. <https://n9.cl/n5mi5>
- Ponce, C. (2019). *Máquina para ensayos de CBR*. s/e.
- Ponce, V. (2018). *Manual de Drenaje: Hidrología, hidráulica, y drenaje*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- Prefectura de Manabí. (4 de Abril de 2002). *En tiempo récord la Prefectura de Manabí habilitó la vía estatal Chone – Flavio Alfaro – El Carmen*. <https://n9.cl/acx6w>
- Quinde, P. (2016). Estudio de peligro sísmico de Ecuador y propuesta de espectros de diseño para la Ciudad de Cuenca. *Revista de Ingeniería Sísmica*, (94), 1-26. <https://www.scielo.org.mx/pdf/ris/n94/0185-092X-ris-94-00001.pdf>
- Ramírez, A. (2012). *La construcción sostenible*. <https://www.virtualpro.co/biblioteca/la-construccion-sostenible>
- Rivera, J. (10 de Junio de 2020). *Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión)*. https://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/2530/3417#toc
- Robinson, G. (2004). *Recycling of construction debris as aggregate in the Mid-Atlantic Region*. U.S. Geological Survey.
- Rodríguez, J. (2018). *Modelización numérica de un terraplén experimental en mogro* [Universidad de Cantabria]. <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/14514>

- Ruiz, A. (2006). *Origen, formación, estructura y comportamiento de las arcillas en Bogotá* [Universidad de los Andes]. <https://n9.cl/9gqzc>
- Ruiz, F. (2020). *Muestras alteradas o representativas*. <https://n9.cl/hnem7>
- Ruiz, F., & Schmidt, C. (2010). *Diseño de terraplenes reforzados sobre suelos blandos: Determinación de la deformación compatible admisible en el refuerzo* [Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica]. <https://n9.cl/x8rrm>
- Sainz, P. (2012). *Watershed management field manual*. s/e.
- Saran, S. (2006). *Soil Dynamics and Machine Foundations*. PHI Learning Private.
- Scholz, C. (2002). *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge University Press.
- Secretaría de Gestión de Riesgos. (2016). *Informe de situación No. 55*. <https://n9.cl/miobd>
- Severiano, M. (2023). *En CDMX, de 14 mil toneladas de residuos de construcción solo se procesan 6 mil cada día*. La Jornada: <https://n9.cl/hqduw>
- Silva, Sousa, D., Pedrozo, & Oliveira. (2023). Evaluación del uso de residuos de hormigón mecanizado en el mejoramiento de suelos arcillosos para aplicaciones vial. Brazilia: *Revista ft*. Obtenido de <https://doi.org/10.5281/zenodo.10139251>
- Soto, J. (2011). *Protección y estabilización de taludes para evitar deslizamientos* [Universidad Austral De Chile]. <https://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2011/bmfci.65p/doc/bmfci.65p.pdf>
- Tam, V. (2008). *An investigation of construction waste management in Hong Kong*. *Construction Management and Economics*. Construction Management and Economics.
- Tarbut, E., & Ludgens, F. (2005). *Ciencias de la tierra*. Pearson Education.
- Telemetry. (2014). *Proyectos integrales de monitoreo automatizado con sensores ambientales en prácticamente cualquier aplicación*. <https://n9.cl/givji>
- Torres, F. (2014). *Investigación geotécnica sobre los tipos de suelos presentes en el campo de trabajo*.
- United Nations. (2015). *Transforming Our World: The 2030*. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- USGS. (13 de Junio de 2008). *What is the difference between aftershocks and swarms?* <https://n9.cl/xnafz>

- Valiente, R. (2019). *Estabilidad de Taludes: Conceptos Básicos, Parámetros de Diseño y Métodos de Cálculo*. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/76781/taludes.pdf>
- Velázquez, C. (10 de marzo de 2016). *Drenaje de la plataforma y márgenes*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/http://www.carreteros.org/normativa/drenaje/5_2ic2016/pdfs/3.pdf
- Yépez, V. (2014). *Compactador monocilíndrico vibratorio autopropulsado de patas apisonadoras* [Universidad Politécnica de Valencia]. <https://n9.cl/gz5u7>
- Zapata, R. (2018). *Caracterización de suelos arcillosos y limosos* [Trabajo de grado, Universidad Nacional de Rosario]. <https://n9.cl/ro3ki>

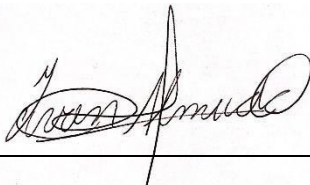
DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Almeida Zambrano Iván Andrés**, con C.C: # **1314591817** autor/a del Trabajo de Titulación: **Reforzamiento de Terraplenes de Arcillas Expansivas con Material Reciclado Pulverizado de Escombros Producidos por Terremotos** previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido Trabajo de Titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido Trabajo de Titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 9 de febrero de 2024

f. 

Nombre: **Almeida Zambrano Iván Andrés**

C.C: **1314591817**



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TEMA Y SUBTEMA:	Reforzamiento de Terraplenes de Arcillas Expansivas con Material Reciclado Pulverizado de Escombros Producidos por Terremotos		
AUTOR(ES)	Iván Andrés Almeida Zambrano		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Colon Gilberto Martínez Rehpani		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de ingeniería		
CARRERA:	Ingeniería civil		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero civil		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	9 de febrero del 2024	No. DE PÁGINAS:	114
ÁREAS TEMÁTICAS:	Geología, geotecnia, materiales de construcción, reciclaje.		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Construcción, carreteras, Material reciclado		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):			
<p>Esta tesis aborda la problemática de los terraplenes construidos sobre suelos arcillosos expansivos, cuyas propiedades pueden generar problemas de estabilidad y deslizamientos. Así, el objetivo principal es investigar y proponer una solución sostenible y económicamente viable mediante el uso de material reciclado de escombros como refuerzo para mejorar las características mecánicas de los terraplenes.</p> <p>De este modo, se realiza un análisis detallado de las propiedades geotécnicas de las arcillas expansivas y los desafíos asociados con la construcción de terraplenes en estas condiciones, asimismo, se examina la composición y el comportamiento del material reciclado de escombros para evaluar su capacidad como agente de refuerzo para las arcillas expansivas</p> <p>El trabajo experimental incluye pruebas de laboratorio para caracterizar las propiedades mecánicas y geotécnicas del material reciclado, así como ensayos de compactación y consolidación en mezclas con arcillas expansivas, lo que permite evaluar la mejora en la resistencia, la compresibilidad y la estabilidad del suelo resultante de la adición del material reciclado.</p> <p>Los resultados obtenidos evidencian mejoras significativas en las propiedades geotécnicas de los terraplenes reforzados con material reciclado. Por ello, se concluye que esta estrategia no solo proporciona una solución técnica efectiva para mitigar los problemas asociados con suelos arcillosos expansivos, sino que contribuye a la sostenibilidad ambiental y la gestión responsable de los residuos de construcción.</p>			
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> Sí	<input type="checkbox"/> NO	

CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593-98640-1038	E-mail: ivan.almeida01@cu.ucsg.edu.ec ivan_almeida98@outlook.com
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::	Nombre: Clara Catalina Glas Cevallos	
	Teléfono: +593-98-4616792	
	E-mail: clara.glas@cu.ucsg.edu.ec	
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA		
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):		
Nº. DE CLASIFICACIÓN:		
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):		