

**Efecto de la temperatura de curado en la resiliencia de residuos marginales de
excavación, construcción y demolición mezclados con cemento hidráulico**

LILIANA CAROLINA HERNÁNDEZ GARCÍA

**UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA DE MATERIALES
MEDELLÍN, COLOMBIA
2024**

**EFFECTO DE LA TEMPERATURA DE CURADO EN LA RESILIENCIA DE RESIDUOS
MARGINALES DE EXCAVACIÓN, CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN MEZCLADOS
CON CEMENTO HIDRÁULICO**

LILIANA CAROLINA HERNÁNDEZ GARCÍA

Tesis de grado para optar el título de
Doctora en Ingeniería de Materiales

Director de Tesis
Henry Alonso Colorado Lopera
Ingeniero Mecánico, Doctor en Ingeniería de Materiales

Grupo de investigación:
CCCOMPOSITIES

**UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA DE MATERIALES
MEDELLÍN, COLOMBIA
2024**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Medellín, octubre de 2024

RESUMEN

Las pruebas de control de calidad aplicadas para medir la compactación, homogeneidad y resistencia de una mezcla de suelo-cemento en la construcción de carreteras se realizan mediante la extracción de muestras inalteradas de la capa previamente compactada y endurecida, para luego someterlas a ensayos en laboratorio y medir su resistencia en tiempo real. Se sabe que, después de llevar a cabo el proceso constructivo en sitio, que incluye mezclado, extendido, compactación y curado, la fractura de la capa para extraer las muestras inalteradas provoca la propagación de fisuras en el material a edades tempranas.

Por otro lado, las especificaciones técnicas para la construcción y rehabilitación de carreteras establecen que la apertura al tráfico debe realizarse a los siete días de edad del material, independientemente del clima y las condiciones atmosféricas a las que haya estado expuesto. Se conoce, además, que las mezclas de suelo-cemento curadas a altas temperaturas desarrollan mayor resistencia que aquellas expuestas a temperaturas bajas. Sin embargo, esta variable no se contempla en la normativa para el diseño de la mezcla ni en los métodos de control de calidad para determinar la apertura al tráfico vehicular.

Además de la temperatura ambiente, existen múltiples variables que aún no se consideran en el diseño de la mezcla de una capa de suelo-cemento, lo que aumenta la complejidad de los procesos constructivos y convierte esta técnica de pavimentación en una de las más inciertas del mercado. Con el objetivo de abordar los retos en el diseño de mezclas de suelos estabilizados con cemento hidráulico, se desarrolló una red neuronal artificial (ANN, por sus siglas en inglés) que amplía el número de variables de entrada con una única variable de salida o respuesta: la dosificación óptima de cemento. Esta se expresa como un valor adimensional, obtenido de la relación entre la masa del cemento y la masa de suelo seco.

Para lograrlo, se correlacionaron variables medibles mediante ensayos no destructivos, como la conductividad térmica del suelo, el monitoreo de la temperatura de curado y la caracterización física y mecánica del sustrato. Se emplearon materiales provenientes de residuos arcillosos clasificados como residuos marginales, según la Asociación Mundial de la Carretera (PIARC), los cuales se mezclaron con cemento hidráulico en distintas proporciones y se almacenaron en tres cabinas de curado que mantuvieron temperatura y humedad constantes durante los primeros siete días de edad. Cada cabina se programó a una temperatura distinta: 10, 28 y 40 grados centígrados.

Con los datos obtenidos de las pruebas experimentales de resistencia a la compresión no confinada, tracción indirecta y módulo resiliente, se realizó un análisis estadístico utilizando modelos de

regresión multivariada, tomando la temperatura de curado como variable interviniente. Los resultados indican que, por cada grado centígrado de aumento en la temperatura de curado, la resistencia a la compresión incrementa en un 2.7%, la resistencia a la tracción indirecta en un 2.5% y el módulo resiliente en un 4.1%.

En otras palabras, una mezcla de suelo-cemento curada a 10°C en un clima frío puede alcanzar una resistencia mínima de 2 MPa, mientras que la misma mezcla curada a 40°C puede lograr una resistencia de hasta 9 MPa, sin necesidad de modificar la dosificación ni las características de los materiales. Esto demuestra un efecto significativo en los modelos de predicción, razón por la cual la temperatura de curado se incorpora en esta propuesta para el diseño de pavimentos y la dosificación de mezclas de suelo-cemento.

Además de los resultados obtenidos en los modelos de predicción, el monitoreo de temperaturas internas y externas de las muestras permitió identificar que, a diferencia del concreto hidráulico, cuya resistencia se desarrolla a partir de reacciones exotérmicas del cemento, en este caso ocurre lo contrario. Debido a que se trata de mezclas secas, no se produce la etapa de disolución del cemento; en su lugar, la arcilla absorbe rápidamente la temperatura del entorno y, mediante una reacción endotérmica, desarrolla resistencia a través de la absorción de calor externo. Por esta razón, la conductividad térmica del material se incluyó en el modelo de predicción, para mejorar la comprensión del comportamiento endotérmico de la mezcla. Esta investigación confirmó que los suelos con mayor contenido de sílice presentan mayor conductividad térmica, al igual que aquellos con mayor contenido de humedad.

En conclusión, las variables más relevantes en el diseño de una mezcla de suelo-cemento son la resistencia a la compresión no confinada, la densidad de la mezcla, la temperatura de curado, el índice de plasticidad (relacionado con el contenido de agua absorbida) y la conductividad térmica.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	4
TABLA DE CONTENIDO	6
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABLAS	15
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS.....	17
1 INTRODUCCIÓN	18
2 CAPÍTULO I: FORMULACIÓN Y REVISIÓN	21
2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	21
2.1.1 PREGUNTA PROBLEMA.....	23
2.2 JUSTIFICACIÓN.....	24
2.3 OBJETIVOS	26
2.3.1 OBJETIVO GENERAL	26
2.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	26
2.4 MARCO REFERENCIAL	27
2.4.1 MARCO DE ANTECEDENTES	27
2.4.2 MARCO TEÓRICO	43
2.4.3 MARCO CONTEXTUAL	53
2.4.4 MARCO LEGAL.....	63
3 CAPÍTULO II: RESISTENCIA DE LAS MEZCLAS CON DIFERENTES TEMPERATURAS DE CURADO	69
3.1 DISEÑO METODOLÓGICO	69
3.1.1 EXPERIMENTOS CON UN SOLO FACTOR BASADOS EN EL ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) 72	
3.1.2 MODELOS DE REGRESIÓN SIMPLE	74
3.1.3 MODELOS DE REGRESIÓN MULTIVARIADOS	74
3.1.4 RED NEURONAL ARTIFICIAL	75
3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	79
3.2.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	81
3.2.2 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)	84

3.2.3	FLUORESCENCIA DE RAYOS X (XRF) Y PÉRDIDAS POR IGNICIÓN.....	87
3.2.4	DIFRACCIÓN DE RAYOS X (XRD).....	88
3.2.5	ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO (TGA) Y CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC)	92
3.2.6	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LOS MATERIALES.....	95
3.2.7	REVISIÓN ESTADÍSTICA MULTIVARIADA.....	96
3.2.8	VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DE REGRESIÓN DE SEGUNDO ORDEN.....	97
3.2.9	RELACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA CON LA COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	102
3.3	INCREMENTO DE LA TEMPERATURA LIBERADA.....	107
3.3.1	NUEVA METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE LA MEZCLA.....	108
3.3.2	VARIABILIDAD DE LA POROSIDAD.....	111
3.3.3	RELACIÓN AGUA CEMENTO.....	113
3.3.4	CONTENIDO DE HUMEDAD ÓPTIMO.....	116
3.3.5	TEMPERATURA DE REACCIÓN EXOTÉRMICA.....	121
3.3.6	TEMPERATURA EXOTÉRMICA EN FUNCIÓN DE LA RELACIÓN AGUA CEMENTO.....	128
3.3.7	TEMPERATURA EXOTÉRMICA EN FUNCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.....	129
3.3.8	TEMPERATURA EXOTÉRMICA EN FUNCIÓN DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD.....	131
3.4	EFFECTO DE LA TEMPERATURA DE CURADO EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA Y LA TRACCIÓN INDIRECTA.....	133
3.4.1	MONITOREO DE TEMPERATURA DE CURADO.....	133
3.4.2	EFFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	137
3.4.3	EFFECTO DE LA TEMPERATURA DE CURADO EN RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA.....	140
3.4.4	EFFECTO DE LA TEMPERATURA DE CURADO EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	145
3.5	EFFECTO DE LA TEMPERATURA DE CURADO EN EL MÓDULO RESILIENTE.....	149
3.5.1	ENSAYO MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS.....	149
3.5.2	EL PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO.....	150
3.5.3	RESULTADOS.....	153
4	CAPÍTULO III: MODELACIÓN DE LA RED NEURONAL ARTIFICIAL.....	167
4.1	BASE DE DATOS.....	167
4.2	RED NEURONAL ARTIFICIAL USANDO NEURALNET, R STUDIO.....	171
4.3	RED NEURONAL ARTIFICIAL USANDO H2O, R STUDIO.....	177
4.4	COMPARACIÓN CON OTROS MODELOS.....	181

5	CAPÍTULO IV: OJETIVOS ALCANZADOS, CONCLUSIONES, PRODUCCIÓN CIENTÍFICA Y RECOMENDACIONES.....	186
5.1	OBJETIVOS ALCANZADOS	186
5.2	CONCLUSIONES	188
5.2.1	CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS ARCILLOSOS PARA OBRAS DE INFRAESTRUCTURA. 188	
5.2.2	MEZCLAS DE RESIDUOS ARCILLOSOS CON CEMENTO HIDRÁULICO.	189
5.2.3	EFFECTO DE LA TEMPERATURA DE CURADO EN LAS MEZCLAS DE RESIDUOS ARCILLOSOS CON CEMENTO HIDRÁULICO.	191
5.2.4	MODELACIÓN DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES PARA MEZCLAS DE RESIDUOS ARCILLOSOS CON CEMENTO HIDRÁULICO	195
5.3	PRODUCCIÓN CIENTÍFICA.....	199
5.3.1	PARTICIPACIÓN EN EVENTOS CIENTÍFICOS	199
5.3.2	PUBLICACIÓN CIENTÍFICA.....	199
5.4	RECOMENDACIONES	201
6	BIBLIOGRAFÍA.....	203

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Resistencia de arena con cenizas volantes y cal curadas en diferentes temperaturas, adaptada de [46]	25
Figura 2. Clasificación de residuos de construcción y demolición RCD, adaptada de [53] página 8.	28
Figura 3. Limitación de suelos marginales, adaptada de [50], página 73.....	29
Figura 4. Documentos registrados en Scopus por país como “Residuos de demolición y construcción”.	30
Figura 5. Documentos publicados por año	31
Figura 6. Patentes de residuos de demolición y construcción.....	31
Figura 7. Patentes publicadas en los últimos 10 años relacionadas con cemento hidráulico bajo carbono.....	34
Figura 8. Representación gráfica de los procesos de energía térmica: conducción, convección y radiación.....	44
Figura 9. Etapas del proceso de hidratación medido por Calorimetrías, Adaptada de [174].	46
Figura 10. Diagrama de conductividad eléctrica de la pasta de cemento, adaptada de [175].	47
Figura 11. Conductividad térmica de suelos arenosos, limosos, arcillosos y turbas, expresadas en Btu/hr-pie ² , adaptada de [182].	49
Figura 12. Anomalías globales en la temperatura terrestre y oceánica, adaptada de [206].	53
Figura 13. Perfiles térmicos de concretos para pavimentos fabricados a diferentes horas del día, adaptada de [208] página 31.	54
Figura 14. Resistencia de suelo cemento a los 3, 7 y 28 días de edad, adaptada de [209].	55
Figura 15. Relación de contracción del suelo-cemento, adaptada de [210].	55
Figura 16. Evolución de resistencias a la compresión de mezclas de suelo cemento, adaptada de [212].	56
Figura 17. Cristales de CSH y CH en cemento curado a altas temperaturas por 90 días, adaptada de [211].	57
Figura 18. Resistencia a la compresión del suelo cemento con agente espumante, adaptada de [213].	57
Figura 19. Madurez de suelo con 10% de cemento, adaptado de [214].	58
Figura 20. Micrografías electrónicas de barrido de muestras de suelo estabilizado, adaptado de [215].	59
Figura 21. Mecanismos químicos de suelo cemento curado a altas temperaturas, adaptado de [215].	59

Figura 22. Relación entre la cantidad de etringita y la resistencia luego de 7 días de curado, adaptado de [216].	60
Figura 23. Muestras relaves de sílice con cemento (CPB) almacenados en diferentes temperaturas, adaptado de [217].	60
Figura 24. Desarrollo del ángulo de fricción interna y la cohesión de la interfaz CPB-roca, adaptado de [217].	61
Figura 25. Límite elástico en el tiempo de relaves con cemento curados a diferente temperatura, adaptada de [219].	62
Figura 26. Moldes usados para realizar el diseño de la mezcla de muestras de suelo cemento, con información tomada de [246], [247], [248], [249], [250].	68
Figura 27. Sección del mapa geológico de Colombia, ubicación Mina T.S. Ingeniería, adaptada de https://srvags.sgc.gov.co .	79
Figura 28. Depósito de residuos arcillosos del lavado de arenas para la producción de concreto, Mina T.S. Ingeniería.	80
Figura 29. Sección del mapa geológico de Colombia, ubicación sabana de Bogotá D.C., adaptada de https://srvags.sgc.gov.co .	80
Figura 30. Diagrama de Atterberg adaptada de [50], con resultados propios.	82
Figura 31. Carta de clasificación de suelos finos método francés adaptada de [265], con resultados propios.	82
Figura 32. Imágenes tomadas de Microscopio Eléctrico de Barrido (SEM) JSM-6490 Muestra 02 CL.	85
Figura 33. Imágenes tomadas de Microscopio Eléctrico de Barrido (SEM) JSM-6490 Muestra 03 CH.	86
Figura 34. Imágenes tomadas de Microscopio Eléctrico de Barrido (SEM) JSM-6490 Muestra 01 SC.	87
Figura 35. DRX Muestra 01 (SC).	89
Figura 36. DRX Muestra 02 (CL).	90
Figura 37. DRX Muestra 03 (CH).	91
Figura 38. Termogravimetría (TGA) y Calorimetría Diferencial de Barrido (DTA) de la muestra 01 (SC).	92
Figura 39. Termogravimetría (TGA) y Calorimetría Diferencial de Barrido (DTA) de la muestra 02 (CL).	93
Figura 40. Termogravimetría (TGA) y Calorimetría Diferencial de Barrido (DTA) de la muestra 03 (CH).	94

Figura 41. Pruebas de conductividad térmica mediante procedimiento de sonda térmica con aguja.	95
Figura 42. Diagrama de cajas y bigotes de los resultados de conductividad térmica, elaborado en R Studio.	97
Figura 43. Verificación gráfica de la normalidad del modelo colisionado para los residuales.	99
Figura 44. Diagrama de multicolinealidad entre las variables que influyen en la Conductividad térmica.	100
Figura 45. Superficie de respuesta de la Conductividad térmica en función del índice de plasticidad (IP), la porosidad (n) y la humedad (W%).	101
Figura 46. Diagrama de Respuestas reales y respuestas previstas a partir del modelo.	102
Figura 47. Diagrama de multicolinealidad de la composición química de las tres muestras.	103
Figura 48. Diagrama de multicolinealidad entre la Conductividad Térmica y la composición química.	104
Figura 49. Diagrama que relaciona el índice de plasticidad con las pérdidas por ignición de 110° a 1000°C.	105
Figura 50. Paso a paso para el diseño de la mezcla Suelo + Cemento.	107
Figura 51. Secado de muestras en temperatura ambiente.	108
Figura 52. Preparación de las muestras.	109
Figura 53. Proceso de compactación de las muestras.	110
Figura 54. Extractor de muestras vertical.	111
Figura 55. Gráficos de cajas y bigotes, histograma y densidad de los valores de porosidad de las 174 muestras.	112
Figura 56. Descripción gráfica con diagramas de cajas y bigotes de las tres variables del diseño.	113
Figura 57. Distribución de frecuencias, densidad y normalidad de las Resistencias a la compresión obtenidas.	113
Figura 58. Diagrama de resultados reales y resultados del modelo de predicción de la resistencia a la compresión.	115
Figura 59. Superficie de respuesta, X: Relación Agua cemento, Z: Contenido de cemento, Y Resistencia a la compresión en MPa un IP= 35.	116
Figura 60. Normalidad de las variables.	117
Figura 61. Gráfica de contornos de los contenidos de humedad para los tres tipos de suelos.	117
Figura 62. Superficie de respuesta, contenido óptimo de humedad.	118
Figura 63. Diagrama de un calorímetro de acuerdo con la norma de ensayo ASTM C186-17.	122
Figura 64. Preparación de las muestras de suelo cemento.	123
Figura 65. Envoltura de las muestras en material aislante.	124

Figura 66. Contenedor aislado	124
Figura 67. Cabina semiadiabática para el monitoreo de temperaturas de reacción exotérmica.....	125
Figura 68. Desarrollo de Temperaturas de las mezclas de suelo cemento en el tiempo.....	125
Figura 69. Diagramas de cajas y bigotes de los datos obtenidos en función de la temperatura exotérmica.....	126
Figura 70. Matriz de multicolinealidad de las variables.....	127
Figura 71. Diagrama de predichos del modelo $T_e \sim R W/C$	129
Figura 72. Diagrama de predichos del modelo $T_e \sim W.mK$	130
Figura 73. Diagrama de predichos del modelo $T_e \sim IP$	132
Figura 74. Almacenamiento de muestras en cabinas de curado.....	133
Figura 75. Registro de temperaturas de las probetas durante las 32 horas iniciales.....	134
Figura 76. Desarrollo de temperaturas de las mezclas de suelo cemento durante las primeras 5 horas.	135
Figura 77. Registro de temperaturas desde la hora 21 hasta la hora 29.....	136
Figura 78. Incrementos de temperatura de las 9 mezclas curadas en diferentes ambientes.	136
Figura 79. Diagramas de XRD para las tres mezclas SC (4609), CL (4610) y CH (4617).....	138
Figura 80. Microscopía electrónica de barrido (SEM) de las muestras antes y después de mezclarlas con cemento.....	139
Figura 81. Diagramas de cajas y bigotes de la resistencia a la tracción indirecta y las variables intervinientes.....	142
Figura 82. Matriz de multicolinealidad de la resistencia a la tracción indirecta y las variables intervinientes.....	143
Figura 83. Diagrama de resultados reales con resultados calculados de la resistencia a la tracción indirecta en función de la temperatura de curado.....	144
Figura 84. Densidad y diagrama de cajas y bigotes de la resistencia a la compresión en función con las demás variables.....	146
Figura 85. Matriz de multicolinealidad de la resistencia a compresión (Mpa), Temperatura de curado (Tem), Relación agua/cemento (A_C), Índice de plasticidad (IP), densidad seca (Ton/m^3) y contenido de cemento (C_S).	147
Figura 86. Diagrama de resultados reales con resultados calculados de la resistencia a la compresión en función de la temperatura de curado.....	148
Figura 87. Incremento del esfuerzo vertical por (a) Bussinesq, Mac Mahon y Yoder, 1961, (b) Modelación de elementos finitos, 2020, adaptado de a) [274], b) [275].....	149
Figura 88. Equipo Triaxial cíclico GCTS usado para esta investigación.....	150
Figura 89. Ensamble de la cámara axial, Universidad Eafit.....	151

Figura 90. Efecto de la tixotropía en el Módulo Resiliente de suelos finos granulares, tomado de [274], página 22.....	152
Figura 91. Registro visual del ensayo y diagrama de pulsos de carga con su respectiva deformación.	153
Figura 92. Gráficos de estadística descriptiva (a) diagrama de cajas y bigotes, (b) histograma, (c) Densidad.....	155
Figura 93. Diagrama original de esfuerzo cíclico y deformación en la prueba de Módulo resiliente SC_19.....	156
Figura 94. Módulo resiliente en función del esfuerzo desviador promedio de los 5 últimos ciclos.	157
Figura 95. Histograma de los 2025 datos registrados de módulos resilientes y su efecto de la temperatura.....	157
Figura 96. Gráficos de descripción estadística de los datos usando R Studio para las muestras SC.	158
Figura 97. Superficies de respuesta de los Módulos resilientes para las muestras SC.	159
Figura 98. Diagrama de datos predichos y datos medidos en el ensayo con muestras SC.	160
Figura 99. Gráficos de descripción estadística de los datos usando R Studio para las muestras CL.	160
Figura 100. Superficies de respuesta de los Módulos resilientes para las muestras CL.	161
Figura 101. Diagrama de datos predichos y datos medidos en el ensayo con muestras CL.....	162
Figura 102. Gráficos de descripción estadística de los datos usando R Studio para las muestras CH.	162
Figura 103. Superficies de respuesta de los Módulos resilientes para las muestras CH.....	163
Figura 104. Diagrama de datos predichos y datos medidos en el ensayo con muestras CH.....	164
Figura 105. Gráficos de descripción estadística de los datos usando R Studio, consolidado general.	165
Figura 106. Superficies de respuesta de los Módulos resilientes, consolidado general.....	166
Figura 107 Diagrama de datos predichos y datos medidos de todas las muestras ensayadas.....	166
Figura 108. Diagrama de multicolinealidad entre las 15 variables numéricas del modelo.....	168
Figura 109. Diagrama de cajas y bigotes entre el módulo resiliente y a) la temperatura, b) Tipo de suelo, c) Peso unitario y el tipo de suelo, d) Módulo resiliente y el contenido de cemento, e) Presión de cámara y f) el peso unitario.....	169
Figura 110. Normalidad de la variable transformada a) histograma, b) densidad, c) diagrama de cajas y bigotes, c) normalidad por cuartiles.....	170
Figura 111. Red Neuronal Artificial, Neuralnet de R Studio.	172
Figura 112. Red neuronal artificial Neuralnet plotnet, R Studio.	176

Figura 113. Diagrama de importancia de las variables en la red neuronal artificial.....	176
Figura 114. Gráfico de importancia de las variables en la Red Neuronal Artificial.....	178
Figura 115. Resultados del entrenamiento y la validación del modelo de Red Neuronal Artificial.	180
Figura 116. Diferencias en la concavidad de las superficies de respuesta de los modelos lineales para el diseño de la mezcla.....	190
Figura 117. Monitoreo de temperaturas de mezclas de cemento ART y agua en diferentes proporciones de Relación Agua Cemento (R A/C)	192
Figura 118. Incrementos de temperatura de las mezclas de suelo cemento.....	193
Figura 119. Red Neuronal Artificial con las variables de mayor importancia resaltadas	197

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Diferentes tipos de arcilla	32
Tabla 2. Revisión de publicaciones realizadas en el año 2023 en Scopus sobre residuos de arcilla. .35	
Tabla 3. Procedimientos de prueba para mezclas de base y subbase con cemento, adaptado de [234].	65
Tabla 4. Método para la elaboración de muestras de suelo-cemento de acuerdo con la regulación vigente, con información tomada de [246], [247], [248], [249], [250].	67
Tabla 5. Relación de ensayos de laboratorio para el Diseño Experimental	71
Tabla 6. Decisión basada en la muestra, adaptada de [252].....	73
Tabla 7. Secuencia de ensayo para suelos (INV-E-156), adaptada de [249].....	76
Tabla 8. Caracterización física de las muestras.	81
Tabla 9. Clasificación de los suelos arcillosos por su actividad, según Skempton, [266].	83
Tabla 10. Análisis químico por Fluorescencia de Rayos X, %Óxidos.....	87
Tabla 11. Semi cuantificación por Difracción de Rayos X, %Óxidos.	88
Tabla 12. Difracción de Rayos X, cualitativo.	92
Tabla 13. Pérdidas de masa por TGA.....	94
Tabla 14. Validación de supuestos para el modelo de correlación entre la conductividad Térmica y el tipo de suelo.....	98
Tabla 15. Validación de los supuestos del modelo RSM.....	101
Tabla 16. Dosificación de las muestras de suelo cemento.	109
Tabla 17. Descripción numérica de la Porosidad de 174 muestras con diferentes características.	111
Tabla 18. Validación de los supuestos del modelo de la Resistencia en función con el IP y la relación agua cemento.	115
Tabla 19. Resumen de los modelos desarrollados para el diseño de la mezcla	120
Tabla 20. Dosificación de las muestras usadas para el monitoreo de temperaturas	121
Tabla 21. Validación de supuestos para el Modelo $T_e \sim R W/C$	128
Tabla 22. Validación de supuestos del modelo $T_e \sim W.mK$	130
Tabla 23. Validación de supuestos del modelo $T_e \sim IP$	131
Tabla 24. Área bajo la curva de la temperatura monitoreada.....	134
Tabla 25. Semi cuantificación por difracción de Rayos X – Cualitativo de las mezclas de residuos con cemento hidráulico.	137
Tabla 26. Composición química por espectrometría de Fluorescencia XRD	140
Tabla 27. Variables transformadas para el modelo lineal de tracción indirecta.....	141

Tabla 28. Validación de supuestos del modelo que relaciona la tracción indirecta con la temperatura de curado	144
Tabla 29. Variables transformadas en el modelo lineal.....	145
Tabla 30. Validación de supuestos Modelo de la Ecuación 15.	148
Tabla 31. Secuencia de ensayo para suelos de subrasante.	151
Tabla 32. Datos iniciales de las 27 muestras falladas.....	153
Tabla 33. Indicadores de estadística descriptiva.....	155
Tabla 34. Matrix de resultados con los pesos de la Red Neuronal Artificial en Neuralnet, R Studio.	172
Tabla 35. Resultados de la Red Neuronal usando H2O.	177
Tabla 36. Parametrización de resultados de la Red Neuronal Artificial en H2O, R Studio.....	178
Tabla 37. Importancia de las variables en el modelo de Red Neuronal Artificial en H2O.....	179
Tabla 38. Modelos de predicción de módulos resilientes.	181
Tabla 39. Modelos de Redes Neuronales Artificiales que tienen el módulo resiliente como variable.	182

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

Símbolo	Término
IP	Índice de Plasticidad
LL	Límite líquido
LOI	Pérdidas por ignición, contenido de materia orgánica
IAM o MBI	Índice de azul de metileno
DRX	Difracción de rayos X
XRF	Fluorescencia de rayos X
SEM	Microscopía Electrónica de Barrido
P200	Material en peso que pasa la malla de 75 μ m
R A/C	Relación Agua Cemento
ANN o RNA	Red Neuronal Artificial
Mr	Módulo Resiliente
σ_c	Esfuerzo a la compresión inconfiada
σ_t	Esfuerzo a la Tracción Indirecta
λ	Coeficiente de conductividad térmica
W%	Contenido de humedad
γ_s	Peso unitario Seco
Gs	Gravedad específica de los suelos
RMS	Root Mean Squared o valor cuadrático medio
R ²	Medida de la precisión general del modelo
RMSE	El error cuadrático medio

1 INTRODUCCIÓN

Esta investigación expone por primera vez, a través de métodos experimentales y del análisis de modelos estadísticos multivariados, el efecto de la temperatura de curado en la resistencia y el módulo de resiliencia de mezclas de residuos arcillosos con cemento hidráulico. Este tipo de mezclas se caracteriza por su baja manejabilidad, asentamiento igual a cero y baja consistencia, ya que contienen bajos niveles de humedad, los cuales varían según el índice de plasticidad del suelo o residuo arcilloso.

Durante el proceso de investigación, se observó que, a pesar de contar con cemento hidráulico como ligante, la falta de fluidez del material reduce la disolución completa de las partículas en el agua. Los bajos contenidos de humedad provocan que la hidratación del cemento compita con la capacidad de absorción y adsorción del mineral arcilloso. Esto debilita la reacción química inicial llevada a cabo por la fase Alita o C3S, encargada de aportar la mayor resistencia mecánica y generar el mayor calor de hidratación. Como resultado, el aumento de temperatura de la mezcla durante las primeras horas de curado no sigue el mismo comportamiento que en un concreto hidráulico.

Por el contrario, en las pruebas realizadas bajo temperaturas controladas, se evidenció que las muestras absorben rápidamente la energía del ambiente mediante un proceso endotérmico. En este sentido, la temperatura ambiente influye directamente en la desorción de las arcillas, facilitando la difusión de iones de calcio y permitiendo su desplazamiento hacia zonas de menor concentración, lo que favorece la formación de hidróxido de calcio y la adherencia de la pasta a las partículas arcillosas. Se observó que a mayores temperaturas se obtienen mayores resistencias del material en sus tres formas: compresión, tracción indirecta y módulo resiliente.

Para facilitar su análisis, es necesario definir tres conceptos clave en el proceso: la resiliencia, la temperatura de curado y los residuos marginales.

La resiliencia, en ingeniería civil, se entiende como un criterio de medida para el diseño de pavimentos. Se define como la capacidad mecánica del material para soportar cargas repetidas o ciclos de carga. Esta unidad de medida es fundamental para correlacionar espesores de pavimentos y constituye la base del diseño de estructuras viales. Inicialmente, los ciclos de carga provocan un reacomodamiento de partículas que mejora la compactación. Sin embargo, tras múltiples ciclos, las estructuras pueden adaptarse, deformarse y recuperarse. Estos ciclos implican esfuerzos cortantes repetitivos que, con el tiempo, pueden causar fatiga en el material. Así, el estudio de la resiliencia está estrechamente vinculado a las cargas del tráfico vehicular y, por ende, al comportamiento de los materiales en carreteras. Esta investigación busca validar el desempeño de un material que funcione como

estructura granular de soporte o subrasante mejorada para pavimentos. Por ello, en el desarrollo del documento, se hace referencia a normativas relevantes para la construcción de vías, como las establecidas por AASHTO, PCA, ASTM e INVIAS.

El segundo concepto clave en esta investigación es el de residuos marginales. Los residuos de excavación, construcción y demolición utilizados en este estudio están categorizados por la Asociación Mundial de la Carretera (PIARC) [1] como residuos marginales, debido a que su transformación para reincorporarlos al mercado es costosa y poco rentable. La característica común de las muestras analizadas es que todas provienen de residuos arcillosos. Dos de ellas fueron extraídas de una mina de explotación de agregados pétreos en un depósito aluvial. Estas formaciones geológicas presentan una gran variabilidad en el tamaño de partículas, que suelen ser redondeadas y requieren trituración, lavado en norias mecánicas y clasificación en diferentes fases según el estándar del producto final.

El primer residuo proviene del lavado de gravas con tamaños nominales de 1/2, 1, 1 1/2 y 2 pulgadas. El agua de las norias se deposita en piscinas de nivel primario, de donde se retira el sedimento con ayuda de una retroexcavadora. El material extraído es una arena fina con alto contenido de arcillas, que no es apta para concretos o morteros debido a su bajo módulo de finura, alta absorción y elevado porcentaje de partículas que pasan por el tamiz 200.

El segundo residuo procede del lavado de arenas, un proceso realizado mediante norias giratorias y piscinas de floculación de niveles dos y tres. Entre ambas piscinas se ubica una canaleta Parshall, donde se aplica un líquido floculador que permite la decantación del material arcilloso en la piscina de nivel tres. Allí, el material se deshidrata de forma natural por efecto del calor ambiental. El agua superficial pasa a una piscina de nivel cuatro, donde se oxigena antes de ser reincorporada al proceso de lavado en la clasificadora primaria. Este residuo contiene una mayor proporción de arcilla que de arena, lo que le confiere mayor plasticidad y cohesión.

El tercer residuo proviene de actividades de excavación profunda en la ciudad de Bogotá, Colombia. Se encuentra almacenado en la Cantera La Fiscala, donde anteriormente se explotaba material pétreo para la producción de arenas y gravas. Al agotarse el estrato de explotación y expirar la licencia minera, quedó un gran cráter que se ha ido rellenando con residuos de excavación procedentes de obras de infraestructura en la Sabana de Bogotá. Dentro de la cantera, los materiales se clasifican por colores y consistencia en cinco depósitos. La muestra seleccionada para esta investigación es una arcilla de color marrón oscuro con alta plasticidad.

El tercer concepto por aclarar es la temperatura de curado. Las mezclas con cemento hidráulico generan reacciones exotérmicas, y la hidratación de sus moléculas es sensible a la temperatura del ambiente en el que se preparan. En el caso de los concretos hidráulicos convencionales e industrializados, la variabilidad de la temperatura ambiente se compensa con un mayor contenido de cemento, el uso de aditivos estabilizadores, la aplicación de hielo o vapor, entre otros métodos que permiten regular los efectos de la reacción exotérmica. Sin embargo, en mezclas de suelos arcillosos con cemento hidráulico, diseñadas para alcanzar resistencias bajas y con bajo contenido de cemento, el comportamiento del material es mucho más susceptible a las condiciones climáticas, especialmente al ambiente de curado.

Esta dificultad surge desde la fase inicial del diseño de la mezcla, ya que las normativas y estándares para la construcción de suelo-cemento en pavimentos exigen un control estricto de la temperatura de curado, el cual solo se puede realizar en cuartos húmedos de laboratorio. No obstante, cuando la dosificación se replica en campo, las condiciones climáticas pueden favorecer o perjudicar el proceso, ya que la temperatura acelera o retrasa el desarrollo de los enlaces de la mezcla.

La presente investigación está organizada en tres capítulos. El primero expone el planteamiento del problema, la justificación y la revisión bibliográfica, estructurada en cuatro marcos de referencia: antecedentes, teórico, contextual y legal. El segundo capítulo describe el diseño metodológico, la caracterización de los materiales, el diseño de la mezcla y los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión, tracción indirecta y módulo resiliente en muestras curadas a diferentes temperaturas.

El tercer capítulo presenta la modelación de los resultados mediante una red neuronal artificial, que posteriormente se compara con otros modelos disponibles en la literatura. A diferencia de estos modelos previos, la propuesta de esta investigación incorpora la temperatura de curado como variable determinante en la resistencia del material. Finalmente, se presentan las conclusiones y se incluyen recomendaciones para futuras investigaciones.

2 CAPÍTULO I: FORMULACIÓN Y REVISIÓN

Resumen

El reciclaje de residuos arcillosos depende en gran medida de la composición química y mineralógica del material. El marco referencial recopila los resultados de la revisión bibliográfica sobre el estado del arte y los conceptos técnicos previamente validados y publicados. Como parte de esta revisión, se publicó un artículo en la revista *Sustainability*, en el que se analizó una amplia variedad de mecanismos para encapsular especies orgánicas e inorgánicas entre las capas de minerales arcillosos mediante diferentes técnicas, como la activación ácida, el intercambio de cationes inorgánicos, la intercalación y la pilarización de arcillas.

Así mismo, se describen nuevas aplicaciones de los materiales arcillosos, lo que abre camino a su uso en el ámbito nanométrico con propiedades funcionales, magnéticas, de adsorción y catalíticas. Como resultado, se identifican nuevas tendencias en la reutilización de arcillas recicladas en proyectos de infraestructura, incluyendo concreto hidráulico, purificación de agua, mejora de la fertilidad del suelo, producción de pigmentos y pinturas, empaque y almacenamiento de alimentos, así como la fabricación de electrodomésticos cerámicos. Estas aplicaciones aportan de manera significativa al análisis y los resultados de esta investigación.

2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El reciclaje de residuos ocupa un lugar importante entre las necesidades mundiales, como lo demuestran las campañas de sostenibilidad que buscan promover estrategias para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, los costos y la explotación indiscriminada de recursos [2]. En respuesta a esta necesidad, la academia impulsa el desarrollo y la adopción de nuevas tecnologías a través de la investigación y publicación científica. Sin embargo, aún se requieren estudios más detallados que permitan su adaptación a diferentes contextos. Para lograrlo, Naciones Unidas estima una inversión de 434.000 millones de dólares anuales para el estudio de materiales y métodos ajustados a cada entorno, con el fin de fortalecer la infraestructura resiliente frente a desastres naturales y mitigar las consecuencias del cambio climático [3].

Diferentes organizaciones mundiales, como la Asociación Mundial de la Carretera (*PIARC*), el Instituto Tecnológico de Massachusetts (*MIT*) y el Departamento de Transporte de los Estados Unidos (*FHWA*), han avanzado en la investigación sobre la utilización de materiales marginales en la construcción, enfocándose en la mejora de residuos de excavación mediante el uso de cal y cemento hidráulico [1]. Se trata de volúmenes significativos de residuos que pueden emplearse tanto en la construcción de viviendas [4] como en la pavimentación de carreteras [5], lo que conlleva ventajas como la reducción de costos de producción, mayores beneficios ambientales y estructuras con una mayor capacidad resistente y resiliente [6] y [7].

Ante un panorama preocupante debido al cambio climático, sus efectos ambientales y el crecimiento acelerado de la población mundial, se prevé que la magnitud y frecuencia de los eventos extremos aumenten proporcionalmente con la variabilidad climática, lo que acentuará la vulnerabilidad de la infraestructura en países menos desarrollados. Solo en América Latina, el reto es aún mayor, pues se estima que el 85% de la malla vial está conformada por carreteras de segundo y tercer nivel, de las cuales solo el 23% están pavimentadas [6]. En Colombia, se espera que para diciembre de 2025 se inicie un plan de acción para la construcción y mejoramiento de accesos y pasos urbanos de la red nacional [8], con el objetivo de incorporar diversas tecnologías sostenibles que promuevan el desarrollo de una movilidad segura y estructuras resilientes, validadas tanto a nivel nacional como internacional.

Las experiencias previas indican que técnicas como la estabilización de suelos [9], [10], el suelo-cemento [11], [12] el macadam mejorado con cemento [13] y las arcillas estabilizadas con cemento [14] pueden adaptarse fácilmente a diferentes contextos. Sin embargo, los ensayos de control de calidad en obra se basan en pruebas destructivas que requieren fracturar el material en edades tempranas [15]. Estas pruebas, destinadas a medir el porcentaje de compactación, la homogeneidad de la mezcla y la resistencia a la compresión [16] [17], siguen los mismos procedimientos y patrones de comparación en cualquier condición climática. No obstante, el proceso de curado y la temperatura ambiente no se mencionan en ninguna especificación, a pesar de que se sabe que el desarrollo de resistencias y la velocidad de formación de enlaces se ven directamente afectados por las condiciones ambientales [18], [19] y [20].

La experiencia en la construcción de carreteras sugiere que el uso de métodos destructivos y la apertura al tráfico antes de alcanzar la resistencia óptima reducen la durabilidad de las estructuras de suelo-cemento. Por ello, es fundamental estudiar el material a partir de variables que puedan medirse de manera sencilla y rápida, como el monitoreo de temperaturas [11], [19], [21], [22], [23], [24], [25].

Sin embargo, los estudios realizados hasta ahora se han basado en casos aislados para sustratos específicos y no han considerado la conductividad térmica como una variable influyente en los modelos de predicción. Esto dificulta la replicabilidad en una amplia variedad de suelos y sustratos, obstaculizando el desarrollo de un estándar de calidad en obra. A diferencia de otros avances tecnológicos en la materia, este trabajo busca relacionar las variables del diseño y la construcción de suelo-cemento en un modelo basado en la resiliencia del material. De esta manera, surge la pregunta de investigación:

2.1.1 PREGUNTA PROBLEMA

¿Qué efecto tiene la temperatura de curado en la resiliencia de residuos arcillosos mezclados con cemento hidráulico?

2.2 JUSTIFICACIÓN

El tratamiento de suelos naturales con otros materiales como el cemento Portland [17], la cal [16], las cenizas volantes [26] y las puzolanas, como el cemento de fosfatos [27], es una técnica estudiada desde los años cincuenta [28]. Estos tratamientos mejoran ciertas propiedades mecánicas, reducen la plasticidad [29], aumentan la resistencia a la compresión [30] [31] y a la tracción indirecta [32], incrementan la rigidez (G) [33] y la resistencia ante esfuerzos cortantes [34], además de mejorar la resistencia al congelamiento y descongelamiento [35], reducir la permeabilidad [36] y aumentar la capacidad de soporte CBR [37], [38], el módulo resiliente [39] y resistencia a la fatiga [40]. Estas técnicas se aplican tanto en la construcción de carreteras [17] como en cimentaciones profundas [41].

Desde la década de 1950, se ha investigado la influencia de las estaciones climáticas en el desempeño mecánico de carreteras construidas con suelo-cemento, concluyendo que en climas tropicales se requiere una menor cantidad de cemento Portland para alcanzar la misma resistencia a la compresión que en climas templados [28]. Asimismo, en términos de cambios volumétricos, se ha observado que los suelos con montmorillonita presentan una mayor contracción que aquellos con caolinita, lo que está relacionado con el contenido de humedad en el moldeado y el grado de compactación [42].

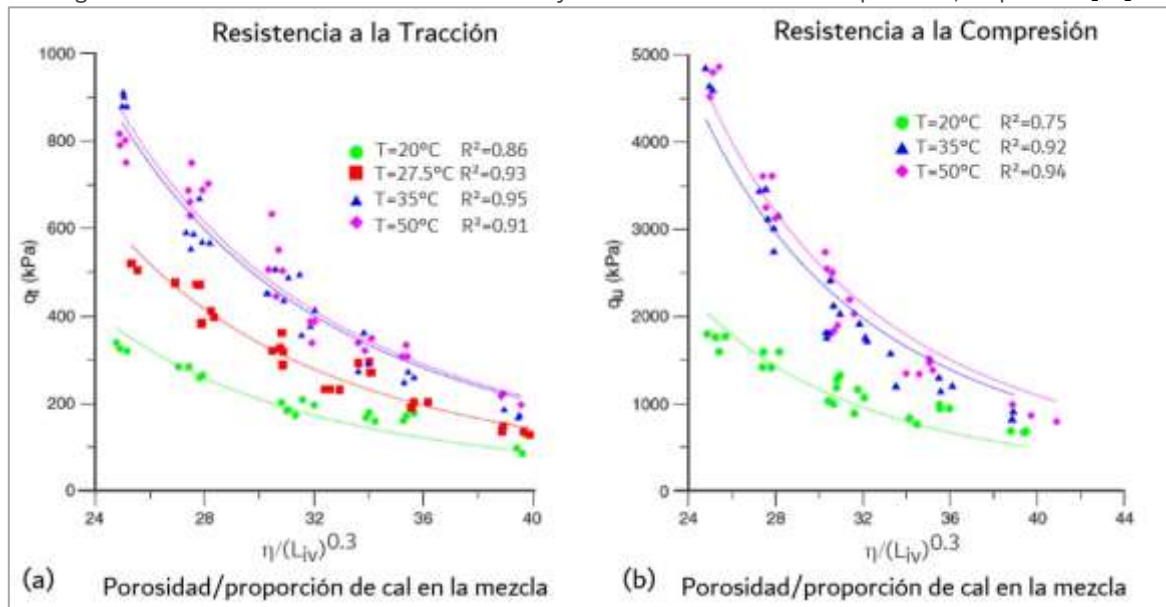
Por otro lado, se ha documentado que los suelos ubicados en minas canadienses pueden estar expuestos a temperaturas cercanas a 400°C [43] debido a reacciones exotérmicas de minerales sulfurosos, como la pirrotina y la pirita, dentro del macizo rocoso, así como a temperaturas generadas por operaciones mineras, transporte de relaves, voladuras, iluminación, ventilación e incendios. En particular, este incremento de temperatura en el curado de la mezcla conlleva beneficios en la resistencia a la compresión, tracción y evolución de resistencias, reduciendo el consumo de aglutinantes y mejorando la durabilidad[44].

Sin embargo, no en todos los casos un curado a mayores temperaturas aumenta la resistencia del suelo-cemento. En el caso de mezclas de suelo con cemento y agentes espumantes, utilizadas para la preparación de terraplenes aligerados, se ha observado que el comportamiento mecánico mejora solo dentro de un rango de temperaturas específico [45]. Se ha reportado que, tras 28 días, las mezclas curadas a temperaturas inferiores a 5°C pueden contraerse hasta 10 mm en longitud, mientras que a 40°C experimentan una expansión de 6 mm.

Además, se ha identificado que la porosidad del suelo-cemento influye en la relación entre la temperatura de curado y el desarrollo de esfuerzos. En estudios realizados en Brasil con mezclas de arena seca de Osorio, cenizas volantes de carbón y cal, se observó que tanto la temperatura de curado como la porosidad afectan la resistencia del material, tal como lo evidencian las líneas de tendencia

presentadas en la Figura 1, donde se muestran los valores de resistencia a la tracción y a la compresión [46].

Figura 1. Resistencia de arena con cenizas volantes y cal curadas en diferentes temperaturas, adaptada de [46]



A esto se suma el hecho de que el suelo-cemento es un material híbrido que no puede evaluarse exclusivamente como un concreto, ya que presenta una ganancia de resistencia adicional debido a su tixotropía. Esta propiedad le permite recuperar su estructura tras un período de reposo posterior al remoldeo.

Si bien Zhang y otros autores evaluaron el incremento de resistencias a largo plazo en suelo-cemento mediante pruebas en muestras con un mayor período de maduración, sus resultados indican que un suelo-cemento curado a una temperatura más alta no solo adquiere mayores resistencias en edad temprana, sino que también mantiene una tasa de crecimiento superior a la del concreto hidráulico en edades avanzadas [47].

2.3 OBJETIVOS

2.3.1 OBJETIVO GENERAL

Identificar el efecto que tiene la temperatura de curado en la resiliencia de residuos marginales de excavación, construcción y demolición tomados de la Mina La Fiscala de Bogotá y la Cantera de agregados T.S. Ingeniería mezclados con cemento hidráulico, a partir del análisis de ensayos no destructivos como la conductividad térmica, la temperatura de curado y el monitoreo de la temperatura.

2.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Realizar la caracterización geotécnica de tres tipos de residuos tomados de la mina La Fiscala en Bogotá y T.S. Ingeniería en Nilo Cundinamarca, para luego comparar sus propiedades con su conductividad térmica, con el propósito de identificar la relación que existe entre esta variable con el índice de plasticidad, la relación de vacíos y la porosidad, composición química de los materiales mediante pruebas de difracción de rayos X (XRD), microscopía electrónica de barrido (SEM), Análisis Termogravimétrico (TGA) y Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).
- ❖ Determinar el incremento de la temperatura liberada por la reacción exotérmica del suelo cemento, empleando tres dosificaciones de cemento hidráulico en condiciones normales conforme al método ASTM D 1632-17.
- ❖ Comparar el efecto de la temperatura de las muestras de suelo cemento curadas en cuartos húmedos con temperaturas controladas a 40°C, 28°C y 10°C en función de la resistencia a la compresión ASTM C1074-19, de la resistencia a la tracción indirecta ASTM C496M-17 y de la resiliencia AASHTO T307-99 (2017).
- ❖ Modelar una red neuronal artificial (ANN) usando R Studio que integre las variables medidas en la etapa experimental con el fin de establecer un modelo matemático que permita estimar la resiliencia del suelo cemento y si la conductividad térmica es una relación significativa en el modelo.
- ❖ Comparar el modelo propuesto en la investigación con modelos publicados que han sido validados en otros contextos.

2.4 MARCO REFERENCIAL

El marco referencial está organizado en cuatro secciones.

- **Marco de antecedentes:** Describe el estado del arte a partir de la revisión de publicaciones científicas, tesis de grado, libros y ponencias que documentan los avances tecnológicos relacionados con los temas de la investigación.
- **Marco teórico:** Presenta y define los conceptos técnicos necesarios para evaluar el comportamiento del material en las condiciones planteadas en el proyecto, permitiendo su comparación y análisis.
- **Marco contextual:** Incluye las variables derivadas de la replicabilidad de la tecnología en diferentes locaciones, así como los efectos del clima y los entornos a los que se exponen las mezclas de suelo-cemento en la construcción de carreteras.
- **Marco legal:** Expone la normativa vigente para la evaluación del material empleado, las pruebas de laboratorio y las técnicas de construcción de pavimentos con suelo-cemento, estableciendo los patrones de medición y comparación.

2.4.1 Marco de antecedentes

El interés por realizar investigaciones sobre el reciclaje de residuos de excavación, demolición y construcción se ha convertido en una tendencia mundial desde que Naciones Unidas emitió la resolución 70/1 del 25 de septiembre de 2015, *“Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible”* [48]. A partir de esta iniciativa, se ha reconocido que la ciencia, la tecnología y la innovación son herramientas clave para impulsar la transformación y alcanzar las metas de desarrollo sostenible [49].

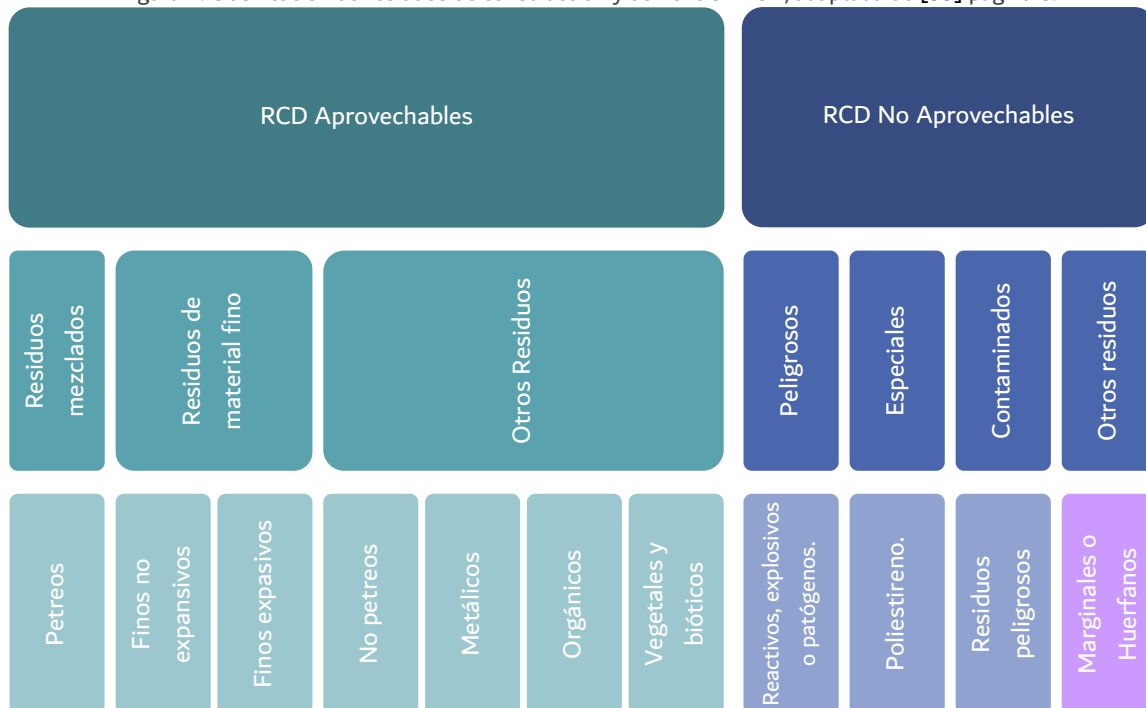
Una de las tendencias más relevantes en este campo es el estudio de los residuos marginales, denominados así por la Asociación Mundial de la Carretera (*PIARC*). Estos materiales, en algunos casos, superan y, en otros, no alcanzan los límites establecidos en las especificaciones técnicas para la construcción de infraestructuras. Aunque estos estándares varían según la necesidad, la innovación o la disponibilidad de materiales, los residuos marginales suelen descartarse debido a dificultades en términos de resistencia y durabilidad, derivadas de su plasticidad, alta absorción, contenido de sulfatos, hinchamiento o cambios volumétricos en condiciones de alta humedad [50].

Dado que la transformación de los residuos marginales para reincorporarlos al mercado es costosa y poco rentable, su reutilización en obras de construcción sigue siendo incierta y compleja [51], [52]. En este contexto, algunos entes gubernamentales han desarrollado estrategias para clasificar los

residuos de demolición y construcción (ver Figura 2) con el fin de establecer métodos para reducir, reutilizar o reciclar estos materiales dentro de los mismos proyectos donde se generan.

Sin embargo, aquellos residuos que no cumplen con las especificaciones para ser reutilizados en el mercado constituyen la materia prima de numerosas investigaciones centradas en su composición química, sus beneficios y sus desventajas. En la Figura 3, se presenta un diagrama de límites de Atterberg, en el cual se enmarca el rango óptimo del índice de plasticidad para distintos tipos de materiales, desde los seleccionados (producidos en planta) hasta los inaceptables, como las turbas o tierras negras con alto contenido de materia orgánica.

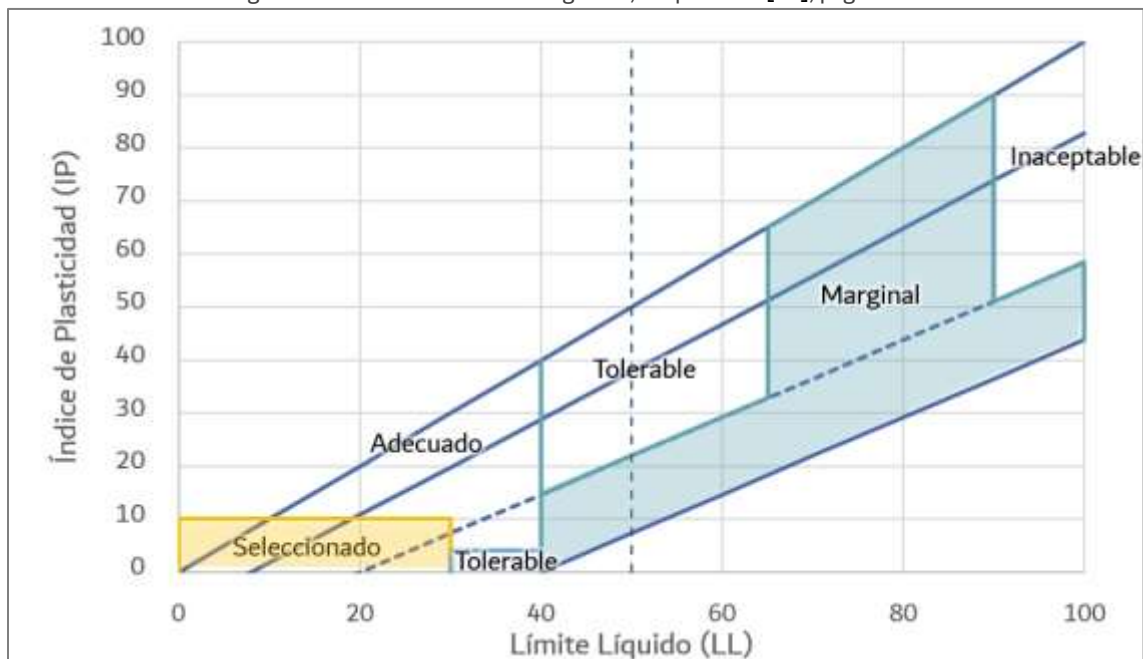
Figura 2. Clasificación de residuos de construcción y demolición RCD, adaptada de [53] página 8.



El límite líquido y el índice de plasticidad son dos parámetros fundamentales en la ingeniería de suelos, definidos por Albert Atterberg. El límite líquido corresponde a la cantidad de agua, expresada en porcentaje, que permite que un suelo pase de estado semisólido a líquido, y se mide con la Cazuela de Casagrande siguiendo el método de ensayo ASTM 4318-17e1. Por otro lado, el índice de plasticidad se obtiene como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, este último definido como la cantidad mínima de agua necesaria para que un suelo adquiriera una textura plástica y semisólida [54].

Un residuo marginal es, por definición, un material altamente cohesivo y arcilloso que, aunque no cumple con los estándares para la construcción de infraestructuras, posee propiedades estructurales y químicas que pueden ser aprovechadas en otras aplicaciones.

Figura 3. Limitación de suelos marginales, adaptada de [50], página 73.



A pesar del volumen significativo de publicaciones sobre residuos arcillosos y residuos marginales de construcción y demolición, la mayor parte de la literatura se centra en el uso de agregados reciclados, hormigón y ladrillos, dejando de lado los beneficios de los residuos arcillosos. No obstante, estos últimos, gracias a su tamaño de partícula, capacidad de adsorción e intercambio catiónico, pueden emplearse como precursores en procesos de encapsulación de minerales peligrosos, transformándolos en materiales útiles, económicos y sostenibles [55].

Un ejemplo de ello es la aplicación de nanotecnología en la industria del hormigón, basada en la composición química y mineralógica de los residuos de arcilla. Diferentes compuestos presentes en estos residuos aportan propiedades específicas:

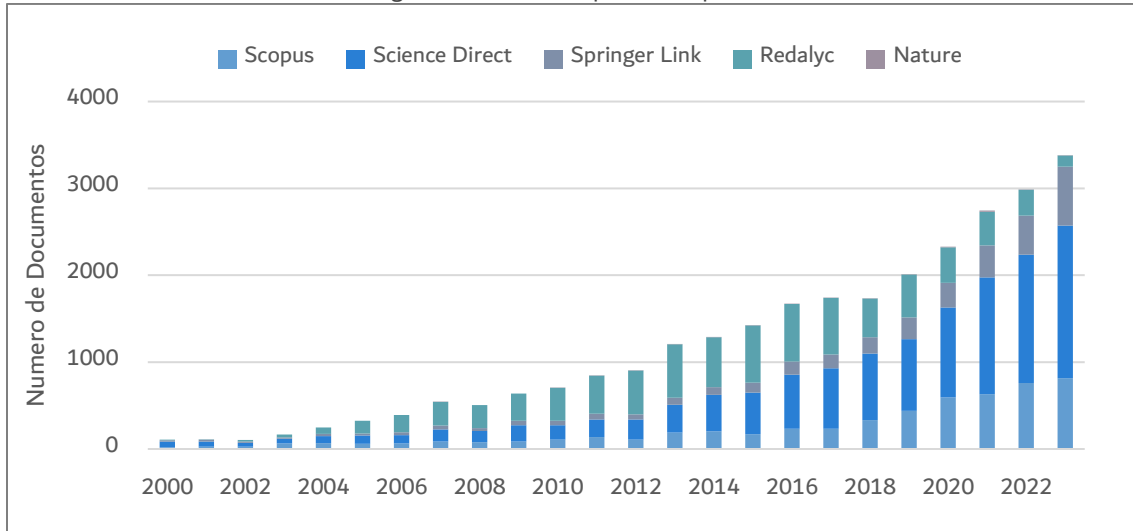
- **SiO₂:** Mejora la trabajabilidad del hormigón, incrementa la resistencia a la disolución del carbonato de calcio y acelera el fraguado.
- **TiO₂:** Proporciona capacidad de autolimpieza y eliminación de contaminantes mediante fotocátalisis.
- **Fe₂O₃:** Se utiliza en estructuras inteligentes para monitorear el estado de tensión en tiempo real.
- **Al₂O₃:** Aumenta el módulo de elasticidad del hormigón.

Además, la arcilla procesada mejora el rendimiento mecánico del hormigón, reduciendo su permeabilidad, aumentando la resistencia al ataque por cloruros y minimizando la contracción térmica [56], [57].

Figura 4. Documentos registrados en Scopus por país como “Residuos de demolición y construcción”.

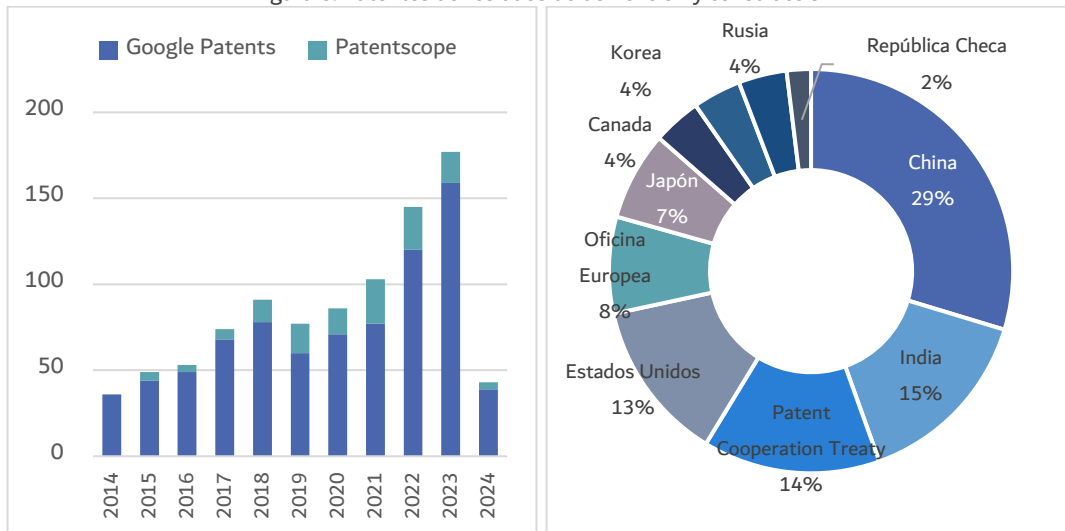
El creciente interés en la reutilización de residuos de construcción y demolición se refleja en el aumento de publicaciones, con un pico máximo en 2017 según *Redalyc* y en 2021 según *Springer*. Los ámbitos de mayor impacto en esta área son la ingeniería y las ciencias de la tierra, con un 20,6% de los estudios cada uno, mientras que sectores como la energía, la química, la ingeniería cerámica y los negocios representan solo un 2,9% cada uno.

Figura 5. Documentos publicados por año



En el mismo período, se registraron 126 patentes relacionadas con tecnologías aplicadas a la demolición y gestión de residuos de construcción. China destaca con el 29% del total de estas patentes, lo que evidencia su liderazgo en el desarrollo de tecnologías alineadas con la protección del medio ambiente.

Figura 6. Patentes de residuos de demolición y construcción



2.4.1.1 Residuos marginales y sus aplicaciones

Los residuos marginales provienen de actividades mineras, relaves, construcción y demolición, y su reutilización requiere procesos industriales complejos y costosos debido a su alta absorción y porosidad, lo que limita su uso en la construcción de nuevos edificios [58]. Entre estos residuos se encuentran los suelos arcillosos resultantes del lavado de arena, la excavación de cimientos profundos, como sótanos y pilotes, y el movimiento de tierras para obras de infraestructura vial. Estos materiales están compuestos principalmente por arcilla y minerales arcillosos, los cuales

pertenecen al grupo de filosilicatos de aluminio hidratados y contienen partículas con diámetros inferiores a 0,005 mm [59].

Generalmente, los residuos marginales son materiales inorgánicos, como feldespato o arcilla madre, que, mediante procesos de meteorización, erosión e hidrólisis, modifican la organización de sus capas intermoleculares de silicato tetraédrico y octaédrico, dando lugar a 30 tipos de nanoarcillas. Cada una de estas presenta diferentes composiciones mineralógicas, capacidades de absorción y adsorción, niveles de hinchamiento y estabilidad volumétrica, características que están directamente relacionadas con el índice de plasticidad y el límite líquido [60], [61]. A continuación en la Tabla 1 se presentan los tipos de arcillas más comunes en los residuos de construcción y demolición.

Tabla 1. Diferentes tipos de arcilla

	Tipo de capa	Grupo	Subgrupo
Feldespato	1:1	Rectorita	
		Caolinita	
		Halloysita	
		Serpentine	
		Chrysotile	
	2:1	Esmectita	Montmorillonita
			Laponita
			Illitas
			Hectorita
			Bentonita
		Vermiculita	Vermiculita
		Talco pirofórico	Pirofilita
			Talco
		Mica	Moscovita
			Paragonita
		Mica Frágil	Margarita
			Clintonita
			Kinoshitalita
	2:1:1	Clorita	Donbasita
			Sudoita
			Chamosita

Gracias a su capacidad de intercambio catiónico, los minerales arcillosos se utilizan en la industria farmacéutica como lubricantes, desecantes, diluyentes, aglutinantes, pigmentos, espesantes y

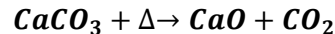
portadores de principios activos [62], [63]. Sin embargo, para reutilizar los residuos arcillosos de construcción, es necesario someterlos a procesos de síntesis, purificación y pilarización [64], [65], [66], lo que reduce su atractivo dentro de una economía circular.

2.4.1.2 Aplicaciones en Hormigón Hidráulico

El hormigón es el material más utilizado en obras de infraestructura, pero también es una de las principales fuentes de emisiones de CO₂ a nivel mundial, debido al alto consumo energético requerido para su producción [67]. La fabricación de una tonelada de cemento libera entre 0,8 y 0,95 toneladas de CO₂ en promedio, dependiendo de la relación clinker-cemento, la eficiencia del combustible, la combinación de combustibles y el uso de electricidad. Estas emisiones provienen tanto de fuentes directas, como la calcinación de CaCO₃ y MgCO₃, como de fuentes indirectas, entre ellas la electricidad utilizada en el procesamiento, producción y transporte de materiales [68].

La producción de clinker se basa en la calcinación de piedra caliza (CaCO₃) para obtener cal (CaO), un proceso que genera una liberación significativa de CO₂ (ver Ecuación 1). Además, la quema de combustibles fósiles para calentar los hornos y el consumo de energía en la extracción y transporte de materias primas generan más de 1.500 millones de toneladas de CO₂ anualmente a nivel mundial [69].

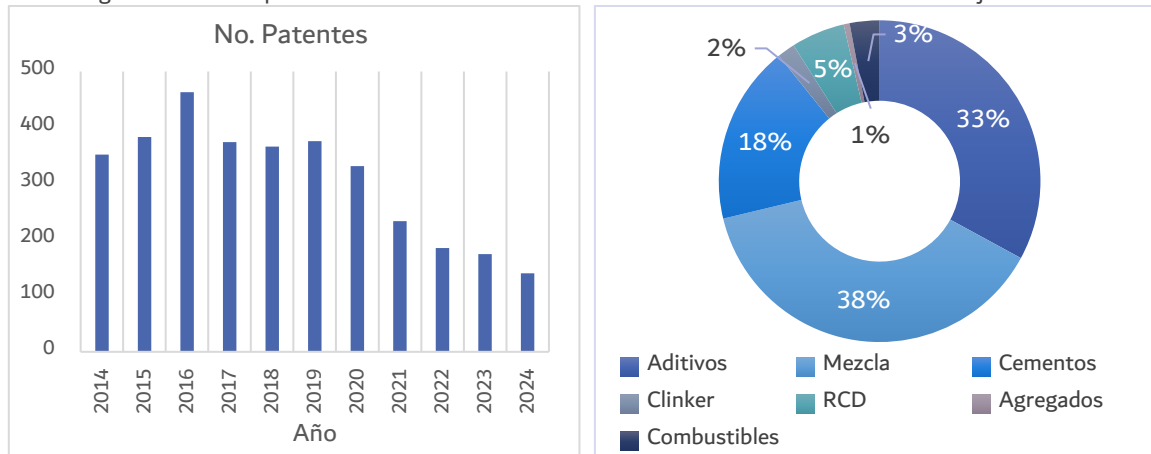
Ecuación 1. Calcinación de Clinker



Reducir el consumo de clinker en la producción de hormigón es uno de los mayores desafíos de la investigación y el desarrollo en la industria. Aunque se han logrado avances significativos, muchas innovaciones aún no han alcanzado la comercialización debido a la falta de demanda y la incertidumbre sobre la calidad del material. Por esta razón, los consumidores suelen preferir métodos tradicionales y conservadores [69]. Según la base de datos *Google Patents*, en los últimos diez años se han publicado 3.377 patentes sobre cementos hidráulicos de bajo carbono (véase la

Figura 7). En los últimos dos años, se registraron 314 nuevas patentes, de las cuales el 33% corresponden a nuevos aditivos para reducir el consumo de cemento, el 38% a diseños de mezclas para hormigones especiales, el 18% a cementos alternativos, el 5% a mezclas que incorporan residuos de construcción y demolición (RCD), otro 5% menciona el uso de combustibles alternativos en la producción de cemento, y solo el 1% aborda el uso de agregados mejorados para reducir el impacto ambiental.

Figura 7. Patentes publicadas en los últimos 10 años relacionadas con cemento hidráulico bajo en carbono.



El hormigón ligero es una alternativa sostenible que permite reducir el consumo de materias primas mediante la incorporación de materiales reciclados, disminuyendo así el impacto ambiental de la mezcla [70], [71]. Estudios en laboratorio han validado la posibilidad de utilizar residuos de cantera como árido fino en mezclas ligeras de hormigón [72], [73]. Sin embargo, su módulo de finura suele ser menor que el de la arena natural, lo que aumenta la demanda de agua en la mezcla y, en consecuencia, el contenido de cemento. Por ello, el diseño de la mezcla debe establecer un contenido óptimo de sustitución del árido fino para lograr una densidad baja sin afectar las propiedades mecánicas del hormigón [74].

Otra forma sostenible de reutilizar residuos de arcilla en el hormigón es mediante el uso de polvo de ladrillo [75]. Durante la fabricación de ladrillos, la arcilla se somete a un proceso de calcinación que transforma la caolinita en una fase amorfa. Este proceso, conocido como deshidroxilación, rompe parcial o totalmente la estructura cristalina, generando una fase con alta reactividad [76], [77].

Este material reacciona con Ca(OH)_2 en presencia de agua para formar hidratos de silicato de calcio (C-S-H) o hidratos de aluminato de calcio (CAH), conocidos como materiales cementosos suplementarios o puzolanas artificiales, que mejoran las propiedades mecánicas y la durabilidad del hormigón. Sin embargo, la puzolanicidad no solo depende de la fase amorfa, sino también de la finura del polvo [76], [78], [79], [80]. Para su reutilización, los residuos de ladrillo deben pasar por un proceso de secado y pulverización hasta alcanzar partículas inferiores a 75 micras.

No obstante, no todos los ladrillos de arcilla contienen caolín, por lo que no siempre se puede garantizar que el polvo de ladrillo tenga propiedades cementantes complementarias. Aun así, su finura ayuda a reducir la porosidad del hormigón, mejorando su consistencia y resistencia, lo que permite una reducción del contenido de cemento de entre un 5% y un 30% en peso [75], [81]. Existe una estrecha relación entre la densidad de la mezcla y el contenido óptimo de polvo de ladrillo, por lo que se recomienda realizar pruebas experimentales que correlacionen estas variables para determinar la dosificación adecuada [82][83], [84], [85].

Otra estrategia para aprovechar los residuos de arcilla en el hormigón es la activación térmica de arcillas para convertirlas en puzolanas o materiales cementantes suplementarios [86]. Estudios de caso han demostrado que arcillas con diferentes contenidos de caolín, calcinadas a 750 °C durante 30 minutos con enfriamiento rápido y molienda final, pueden exhibir reactividad puzolánica en mezclas de hormigón. Sin embargo, a los 28 días, no se observan diferencias significativas en la resistencia entre estas y otras meta-arcillas con menor contenido de caolín, siempre que se mantenga la finura del material [87], [88].

Uno de los beneficios de agregar arcillas activadas térmicamente a la mezcla es la reducción de la cantidad de aluminato tricálcico (C_3A) en la reacción, lo que disminuye la alcalinidad del hormigón y la cantidad de etringita, mitigando así el daño por ataque de sulfatos [89], [90]. Asimismo, al reducir la porosidad con un polvo fino, se densifica la microestructura del hormigón, disminuyendo su permeabilidad y reduciendo los riesgos asociados a la reacción álcali-sílice y álcali-carbonato[91], [92]. No obstante, la adición de estos polvos finos reduce la fluidez de la mezcla, por lo que generalmente se requiere el uso de aditivos plastificantes o superplastificantes.

Para el año 2023, *Scopus* registró diversas publicaciones sobre la reutilización de residuos de arcilla. En la Tabla 2 se presentan los resultados más relevantes sobre sus propiedades físicas y químicas.

Tabla 2. Revisión de publicaciones realizadas en el año 2023 en Scopus sobre residuos de arcilla.

	Título	Fuente	Progreso
1	Ladrillos de arcilla reciclados y cáscara de almendra de palma como sustrato de humedal construido para el tratamiento de aguas residuales: un enfoque de economía circular de circuito cerrado diseñado.	[93]	Se comparó el rendimiento del polvo de ladrillo de arcilla mezclado con cáscaras de palma para mejorar el tratamiento de aguas residuales. La prueba mostró que la arcilla tiene una alta capacidad de adsorción, mientras que las cáscaras de palma influyen en la eliminación de la turbidez. Aunque no fue posible disminuir los coliformes, el pH y las condiciones físicas con el polvo de arcilla

	Título	Fuente	Progreso
			notaron un mayor crecimiento de la vegetación que con las conchas de palma.
2	Propiedades Hidrogeológicas de la Till Enmendada con Heces de Licor Verde (GLD): Reciclaje de un Residuo Industrial para la Recuperación de Sitios Mineros Generadores de Ácido.	[94]	El drenaje de ácidos de roca en la minería es una amenaza para el medio ambiente, para mitigarlo se evaluó la capacidad de reducir la conductividad hidráulica del material utilizando un residuo de producción de celulosa y papel (Green Liquour Dregs (GLD)). Aunque la permeabilidad se redujo, se identificó que la capacidad de retención de agua depende del contenido de finos, la humedad inicial, la densidad seca y el esfuerzo de compactación.
3	Reciclaje avanzado de residuos plásticos: el efecto de la arcilla en el comportamiento morfológico y térmico de las mezclas sostenibles de PET/PLA reciclado.	[95]	La hipótesis de la presencia de nanoarcilla da como resultado una mezcla de nanocompuestos más estable que exhibe una estructura cristalina similar independientemente de la cantidad de PET o PLA. En bajas cantidades de nanoarcilla dan como resultado estructuras parcialmente exfoliadas e intercaladas. mientras que una gran cantidad da lugar, además de las estructuras intercaladas, también a toques arcillosos (agregados), La existencia de la nanoarcilla actúa como agente nucleante.
4	Investigación sobre la idoneidad de los lodos de tratamiento de aguas a base de aluminio como sustituto sostenible del suelo para la construcción de carreteras.	[96]	Se validó el mejoramiento de una subrasante arcillosa con residuos de relaves ricos en Aluminio (>30%), donde se identificó una reducción en el índice de plasticidad y un aumento en la resistencia a compresión monotónica, cortante, triaxial y triaxial cíclica.

	Título	Fuente	Progreso
5	Efectos de la homogeneización por cizallamiento en estado fundido en el pirólisis catalítico de residuos plásticos mixtos para el reciclaje de materias primas.	[97]	Indica cómo un catalizador a base de arcilla tiene efectos en la disminución de la energía de activación para el reciclaje de residuos plásticos no homogéneos y a su vez consigue aumentar la tasa de degradación, sin cambiar los mecanismos/cinética de degradación.
6	Incorporación de adsorbente a base de arcilla en la membrana de fluoruro de poli vinilideno para mejorar la captura de fósforo en solución acuosa.	[98]	Se describe el comportamiento de una membrana de poli vinilideno (PVDF), después de que se incorporó un adsorbente de arcilla bentonítica modificada, con el fin de absorber la mayor cantidad de fósforo (P) de los residuos de la planta de tratamiento de aguas residuales.
7	Eliminación de contaminantes químicos y biológicos de las aguas residuales porcinas a través de humedales artificiales con el objetivo de reutilizar el agua regenerada.	[99]	Se prueba un filtro expandido de arcilla y roca volcánica para eliminar los contaminantes químicos y biológicos de las aguas residuales de las industrias ganaderas. Después de 15 días, una reducción significativa de Clostridio, Enterococos.
8	Efecto de los biorresiduos y los aditivos de los residuos de la construcción en la deshidratabilidad mecánica de los sedimentos lacustres para la producción de ladrillos.	[100]	Los desechos orgánicos como el polvo de cáscara de arroz, el polvo de grano de maíz, el polvo de cáscara de maní, el bagazo de caña de azúcar y los desechos inorgánicos como el polvo de concreto celular como el polvo de piedra, se utilizan para reducir la humedad de los sedimentos del lago, para la producción de ladrillos. Donde se registran reducciones de humedad del 5% al 25%, logrando ahorros energéticos en la producción de ladrillos.
9	Utilización de residuos de mezclas de construcción y demolición en la producción de ladrillos cocidos: el impacto en las propiedades mecánicas.	[101]	Se compara la incorporación de residuos de demolición y construcción en la producción de ladrillos de arcilla calcinada. Sin embargo, cuando se identifique que el mayor contenido de residuos es del 25% de la mezcla, la temperatura de cocción debe elevarse a 900 °C. Mientras que con una dosis del 10% se pueden producir con la misma calidad a 850°C.

	Título	Fuente	Progreso
10	¿Se pueden utilizar las nano fibras de celulosa oxidadas TEMPO como aditivos en materiales de construcción de base biológica? Un estudio preliminar sobre los revoques de tierra.	[102]	Se describe un estudio preliminar comparando el comportamiento de una arcilla de Illita y un limo de compresibilidad media, mezclado con celulosa para la fabricación de revoques. La mezcla de arcilla no funcionó bien, mientras que el limo de celulosa mejoró la adherencia y redujo la permeabilidad.
11	Efecto de la adición de residuos orgánicos (polvo de corcho, cáscara de nuez, posos de café y lodos de papel) en arcillas para obtener agregados ligeros expandidos.	[103]	Se identificó que, con la mezcla de residuos orgánicos como polvo de corcho, cáscaras de nuez, posos de café y lodos de papel, en arcillas es posible obtener agregados expandidos ligeros, luego de un proceso de calcinación en horno rotatorio, generando ahorro de energía ya que reduce de 10 a 50°C en el proceso de cocción.

2.4.1.3 Aplicaciones en prefabricados e impresión 3D

Las piezas prefabricadas, como los adoquines y los ladrillos de arcilla son los materiales de construcción más tradicionales por su costo y producción. Existen técnicas artesanales y métodos industriales más eficientes que permiten moldear piezas especiales, gracias a la plasticidad y absorción del material arcilloso. Las normas técnicas indican que un adoquín de arcilla debe tener una resistencia de 20 MPa para tráfico ligero y de 55 MPa para una carretera con tráfico pesado [104]. Mientras que un mampuesto debe tener una resistencia a la compresión de 13 MPa para la construcción de edificios [105].

Se han experimentado procedimientos a partir de desechos mineros y residuos de relaves para fabricar mamposterías resistentes al hielo-deshielo, con resultados favorables en mezclas de cemento Portland y cal viva, curados con tratamientos hidrotermales. Para su fabricación los mampuestos son curados en cámaras de vapor a una temperatura promedio de 90°C durante 9 horas, con una rampa de calentamiento y enfriamiento de 1,5 h, para un total de 12 horas de curado [106].

Además de las innovaciones en los procesos de fabricación, hay una variedad de mezclas que incorporan desde chatarra plástica con resistencias de 38 MPa [107], residuos orgánicos calcinados con dosificaciones de hasta el 12% del peso de la mezcla con concentraciones de 20 MPa [108], mezclas de aglutinantes geopoliméricos con residuos de arcilla como ladrillos, tejas de arcilla y vidrio cuyas resistencias son cercanas to 35MPa [109], [110]. Todos ellos comparten las ventajas de la fabricación sostenible, a partir de materias primas recicladas, que no requieren de la infraestructura tradicional y el consumo de energía para calcinar los bloques de arcilla. Según los métodos tradicionales, requieren de enormes hornos para almacenar los ladrillos donde se secan durante 3

días a 60°C y terminan con la cocción durante 48 a 72 horas a temperaturas que oscilan entre 800 y 1200°C, para llegar a su sinterización [111].

Al mismo tiempo, se avanza en técnicas más sofisticadas como la impresión 3D. Estudios experimentales indican que la arcilla activada térmicamente, como el polvo de ladrillo, mezclada con piedra caliza pulverizada y materiales cementosos, debidamente humedecida y homogeneizada en un intervalo de tiempo entre dos capas adyacentes de 20 segundos, registra resistencias de 3 a 3,8 MPa. Mientras que, con intervalos de tiempo más largos, la resistencia tiende a disminuir la unión entre las capas [112]. Por otro lado, utilizando métodos de escaneo en las pistas recién impresas, se puede identificar que con una baja velocidad de 30 mm/s y un alto caudal de extrusión (0,38ml/s) se consigue una mayor calidad en la impresión en este tipo de materiales [113].

Por otro lado, la fluidez de la pasta de arcilla depende directamente de la técnica de impresión 3D. Se dispone de experiencias en cerámica fabricada por DIW (escritura directa con tinta) en las que las proporciones agua/arcilla de 0,68 y 0,72 y las adiciones de cenizas volantes tienen un efecto favorable en la trabajabilidad y el acabado de la superficie y se pueden lograr resistencias de 25 a 45 MPa [114], [115]. Algunos expertos recomiendan el uso de glicerina y aditivos plastificantes, como el poliacrilato de sodio, para mejorar el proceso de impresión. Asimismo, existen estudios que buscan la encapsulación de residuos peligrosos como el polvo de acero de horno de arco eléctrico (EAFD) en la impresión de cerámicas utilizando mezclas de arcillas que contenían entre un 10 y un 20% de residuos, donde se obtienen mejores resistencias, gracias a la formación de ferrita magnésica (MgFe_2O_4) a partir de la interacción entre la arcilla y los residuos [116].

2.4.1.4 Purificación de agua

Otro tipo de arcillas presentes en los residuos de construcción y demolición son las montmorillonitas y las illitas, conocidas por su alta capacidad de intercambio catiónico. Estas propiedades las hacen efectivas en la adsorción de contaminantes portadores de carga [117], [118], lo que las convierte en un material adecuado para la purificación de agua contaminada. En particular, las montmorillonitas generan ligeras expansiones entre sus capas de tetraedros, lo que aumenta su hidrofobicidad y su capacidad de quimisorción de analitos [119]. Esto sugiere que las arcillas expansivas podrían desempeñar un papel similar al del carbón activado en la purificación de aguas residuales, ya que poseen la misma capacidad para eliminar selectivamente el perclorato y las bacterias patógenas presentes en el agua contaminada [120], [121].

Además, durante el proceso de filtrado y sedimentación de aguas residuales, se decantan arcillas que, dependiendo de sus propiedades de adsorción y porosidad, pueden utilizarse como soporte catalítico o medio filtrante mediante la fabricación de vitrocerámicas celulares [121]. Asimismo, los residuos

generados en procesos de blanqueo de aceites o zumos con arcillas pueden servir como precursores de carbono [122], [123]. Estos residuos suelen estar compuestos por una mezcla de materiales minerales y desechos orgánicos que, al ser pilarizados a bajas temperaturas, pueden producir carbono en superficies de minerales arcillosos a escala nanométrica. Esto les confiere una capacidad de sorción similar a la del carbón activado, pero con la ventaja de que su producción requiere temperaturas significativamente más bajas, lo que reduce la huella de carbono [124], [125].

En general, la purificación del agua con residuos de arcilla es un método prometedor debido a su bajo impacto ambiental y costo. Los minerales difíciles de descomponer pueden ser encapsulados, lo que facilita la eliminación de antibióticos y desechos nucleares [126], [127]. Para ello, se emplean nanocompuestos preparados con minerales arcillosos combinados con otros materiales, como polímeros, biopolímeros, ácidos, alcoholes, tensioactivos u otros compuestos orgánicos. Sin embargo, la falta de porosidad permanente —es decir, la variación en la porosidad de la arcilla en condiciones secas y húmedas— es una característica que debe mejorarse para optimizar el rendimiento del adsorbente. Esto solo se consigue mediante técnicas de modificación física y química de los minerales arcillosos, como la intercalación de cationes en el espacio interlaminar [128], la síntesis de nanocompuestos con pilares metálicos o la combinación con biocarbón u organocaciones. Estos procesos pueden realizarse mediante activación térmica o química, y en ambos casos se logra aumentar el área superficial específica y ampliar las dimensiones de los poros [129], [130], [131].

La técnica conocida como pilarización de arcillas tiene como propósito incrementar el espacio entre sus capas mediante la incorporación de columnas estables de óxido de metal, las cuales separan las capas de silicato y crean espacios intersticiales de dimensiones moleculares permanentes. Esta separación se logra a través de la hidrólisis de óxidos metálicos o sales en una *solución de pilares*, donde ocurre un intercambio iónico entre los cationes intercambiables de la arcilla y los agentes del pilar. Una vez la estructura ha sido expandida, el material se somete a un proceso de lavado y secado para transformar los precursores en pilares estables. Finalmente, se expone a un tratamiento térmico para la deshidratación y deshidroxilación, consolidando la estructura del material. Dependiendo de la solución utilizada y los precursores empleados, se pueden obtener diferentes tipos de pilares, como cationes orgánicos, cationes organofílicos, clústeres metálicos, polioxicaciones, óxidos y óxidos metálicos mixtos [132], [133], [134].

2.4.1.5 Fertilización del suelo

Los residuos arcillosos de demolición y construcción, además de contener minerales, suelen presentar carbonatos y fósforo, los cuales, mediante técnicas de intercambio catiónico y saturación de bases, pueden contribuir a la recuperación de suelos ácidos. Se han realizado diversos experimentos en los

que residuos de construcción y demolición (*RCDs*), previamente secados, triturados y pulverizados, se mezclan con compost de corteza de eucalipto. Como resultado, se ha observado un impacto favorable en el cultivo de avena negra (*Avena strigosa*), gracias a la capacidad de retención de líquido, la porosidad y el pH del sustrato mejorado [135].

El uso de compost para mejorar suelos agrícolas, combinado con residuos *RCDs*, representa una alternativa sostenible para el paisajismo y la restauración de zonas afectadas por la erosión y la degradación del suelo [136]. En la India, se han probado enmiendas de origen animal y vegetal, como estiércol de ovejas y aves, así como ceniza de cáscara de arroz mezclada con residuos arcillosos. Los resultados han mostrado un aumento en el tamaño de los frutos cultivados, lo que ha mejorado la rentabilidad y la producción agrícola [137].

Estos beneficios se deben, en gran medida, a que los suelos poco productivos suelen presentar un pH ácido, el cual puede corregirse mediante la aplicación de cal, logrando un aumento en el pH y mejorando su estabilidad. Además, el contenido de arcilla y carbono en los residuos aporta estabilidad química, mientras que los nutrientes provenientes de la biomasa o del biocarbón quedan incrustados en la matriz arcillosa. A esto se suma la capacidad de retención de humedad de la arcilla, lo que acondiciona el terreno y permite mantener una producción estable incluso en épocas secas, como en otoño [138].

2.4.1.6 Pigmentos y pinturas

La interacción huésped-huésped entre los minerales arcillosos y los tintes orgánicos, a través de enlaces de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals, es una característica de arcillas como la paligorskita, lo que las hace atractivas para diversas aplicaciones, incluyendo el diseño de pigmentos [139], almacenamiento y conversión de energía, electrónica y biosensores.

Otro mineral de arcilla de gran interés es la haloisita, una arcilla dioctaédrica considerada un polimorfo hidratado de la caolinita, caracterizada por sus láminas curvadas y su capacidad para almacenar moléculas de agua en el espacio interlamilar [140]. Sus partículas pueden adoptar diversas formas, como esferas, tubos, placas o listones. Las fibras tubulares de haloisita se generan debido a un desajuste en la alineación entre la capa tetraédrica de sílice y la capa octaédrica de alúmina. La superficie exterior del nanotubo lleva una carga negativa, funcionando como un anión polivalente, mientras que los bordes son anfóteros, con carga negativa a pH alto y carga positiva a pH bajo [141]. Estas propiedades mejoran su capacidad de adsorción de colorantes aniónicos y catiónicos, facilitando su uso como detergente en la limpieza de tintes y manchas en textiles. Estudios han demostrado que “las telas manchadas, después de un tratamiento con nanotubos de haloisita,

retienen una alta blancura y evitan que las manchas se adhieran nuevamente a la superficie de los textiles” [142].

Por otro lado, la nanoarcilla Cloisita se utiliza para mejorar el rendimiento de pinturas epóxicas ricas en zinc. Gracias a su capacidad de intercambio catiónico, optimiza los efectos de barrera y reduce el consumo de polvo de zinc [143]. Además, el uso de relaves ricos en este mineral en la fabricación de eco-pinturas de látex PVA ha demostrado ser más eficiente cuando se incorpora la molienda de residuos de granito en el proceso de producción [144]. Esto no solo contribuye al desarrollo sostenible, sino que también mejora la resistencia a la abrasión debido a la dureza y abrasividad de las partículas [145]. Sin embargo, para optimizar su desempeño, es necesario combinarlas con otros catalizadores que regulen el pH, ya que los residuos de granito aumentan la alcalinidad de la mezcla, afectando la resistencia de la película de pintura [146].

2.4.1.7 Envasado y almacenamiento de alimentos

La investigación en el envasado de alimentos ha propuesto la combinación de compuestos bioactivos naturales con nanopartículas de propiedades antimicrobianas, con el objetivo de mantener la calidad de los alimentos envasados. Entre las fuentes más utilizadas para estos compuestos bioactivos se encuentran los nanocompuestos arcilla-polímero. En particular, la arcilla montmorillonita posee una nanoestructura ideal para mejorar la resistencia mecánica y proporcionar propiedades de barrera contra la luz, además de ofrecer efectos antimicrobianos y antioxidantes que protegen los alimentos de la degradación [147].

Gracias a su capacidad de intercalación, las nanoarcillas han sido estudiadas como material de nanoempaqué para las industrias cosmética, biomédica y alimentaria, así como material de refuerzo en termoplásticos [148]. Además, investigaciones han demostrado que las nanoarcillas pueden actuar como nanocontenedores para convertir sustancias líquidas en polvos sólidos, lo que facilita su manipulación y transporte [149].

Sin embargo, asumir que todos los residuos arcillosos pueden utilizarse en el envasado de alimentos sería un error. Para desarrollar un nanocompuesto arcilloso adecuado para este propósito, es fundamental realizar una evaluación detallada, ya que estudios han demostrado que la toxicidad de las organoarcillas varía en función del modificador utilizado [150].

2.4.1.8 Cerámica en tonos blancos

La cerámica blanca es un producto ancestral que se remonta a los años 4300-2400 a.C., industrializado originalmente en China y la India. Conocida como porcelana, la arcilla caolinita se

convirtió en un símbolo de diversas culturas, así como en un elemento clave en la tecnología y el arte prehistórico [151].

Actualmente, la investigación en este campo se enfoca en la incorporación de desechos en la fabricación de cerámica. La mezcla de caolín con residuos de arena de fundición de acero mejora la densidad, reduce la retracción durante la cocción y aumenta la resistencia mecánica. Sin embargo, también disminuye la absorción de agua, debido a la formación de una mayor cantidad de fases vítreas y mullita durante la sinterización [152], [153]. Por otro lado, los residuos generados en el pulido de gres han demostrado ser efectivos para reducir el tiempo y la temperatura de sinterización en la producción de cerámica celular [154].

Los procesos de producción de gres porcelánico han evolucionado con el desarrollo de nuevas tecnologías que incluyen modificaciones en la composición química del material, la presión de compactación, el tiempo de cocción, la temperatura máxima de sinterización y el templado. Este último consiste en un enfriamiento brusco o químico que facilita el intercambio iónico y la sustitución catiónica entre iones de diferente radio [155]. Estas innovaciones han permitido la incorporación de residuos, como los sanitarios vitrificados, los cuales presentan una mayor resistencia y coeficientes de dilatación térmica reducidos [156].

Se han obtenido hallazgos similares con los relaves de magnetita de vanadio-titanio en la producción de cerámicas espumadas. Esta práctica no solo reduce el impacto ambiental, al reutilizar un material altamente contaminante, sino que también mejora las propiedades del nuevo material cerámico [157]. Sin embargo, la adición de residuos en las mezclas puede afectar ligeramente el color blanco de la cerámica, por lo que se recomienda realizar un proceso de blanqueamiento del residuo antes de integrarlo a la mezcla [158].

2.4.2 Marco teórico

La temperatura es una propiedad de los materiales que determina si un sistema está en equilibrio térmico con su entorno. Este equilibrio se alcanza mediante la transferencia de calor (Q), ya sea desde o hacia el medio circundante [159]. El calor, a su vez, se define como la energía térmica asociada al movimiento de átomos, moléculas y electrones dentro de un cuerpo o ambiente. En términos termodinámicos, la transferencia de calor se considera positiva ($Q > 0$) cuando un sistema gana energía térmica del entorno, y negativa ($Q < 0$) cuando la pierde. Se dice que un sistema está en equilibrio térmico cuando su temperatura es igual a la del ambiente y no hay flujo neto de calor ($Q = 0$), lo que se cuantifica en joules [160].

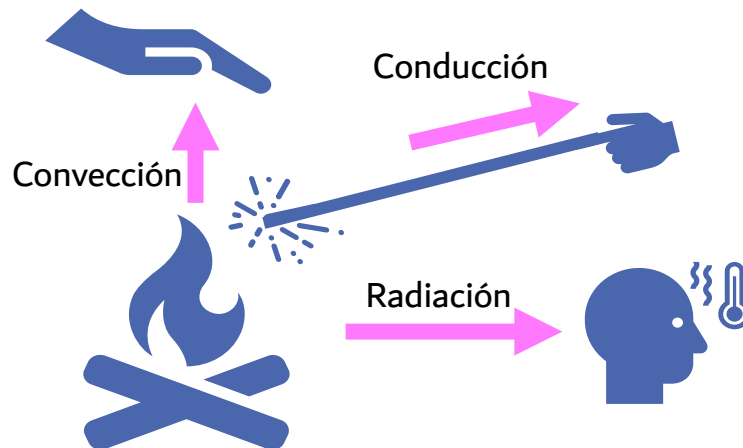
Inicialmente, la magnitud del calor se medía en función de su capacidad para elevar la temperatura del agua, lo que dio origen a la caloría (*cal*), definida como la cantidad de calor necesaria para aumentar en 1°C la temperatura de 1 gramo de agua. Sin embargo, James Prescott Joule (1843) demostró experimentalmente la equivalencia entre la caloría y el joule, estableciendo que 1 cal equivale a 4,186 J, mientras que 1 kilovatio-hora (*kW·h*) equivale a $3,60 \times 10^6$ J. Además, si se transfiere calor a un cuerpo, su temperatura aumenta de manera proporcional a la cantidad de calor absorbido. La constante de proporcionalidad entre la diferencia de temperatura y el calor es la capacidad calorífica, expresada en julios por kelvin (*J/K*). Por lo tanto, el cambio de temperatura en función del calor transferido por unidad de masa se conoce como calor específico, medido en *J/(kg·K)* o *J/(kg·°C)* [161].

De esta manera, la relación entre el cambio de temperatura y el calor se expresa mediante la ecuación:

$$Q = cm\Delta T$$

La transferencia de energía térmica en la naturaleza ocurre principalmente a través de tres mecanismos: **radiación, convección y conducción**. La conducción transmite calor dentro de un material mediante la vibración de átomos y moléculas, así como por el movimiento de electrones. Se sabe que el concreto tiene una conductividad térmica (*k*) de aproximadamente 0,8 W/(m·K), mientras que los suelos cohesivos varían entre 0,3 y 0,7 W/(m·K), dependiendo de su grado de compactación y relación de vacíos [162]. Por otro lado, los suelos granulares consolidados pueden alcanzar valores entre 3 y 7 W/(m·K) [163].

Figura 8. Representación gráfica de los procesos de energía térmica: conducción, convección y radiación.



2.4.2.1 Instrumentos de medición térmica

El dispositivo utilizado para medir la temperatura se conoce como **termómetro**, el cual puede calibrarse mediante la velocidad del sonido en un gas (*termómetro primario*) o mediante un

termómetro de referencia estándar (*termómetro secundario*), como el termómetro de mercurio. Otros tipos de dispositivos incluyen los termómetros bimetalicos, los termopares, los basados en quimioluminiscencia y los termistores. La temperatura también puede determinarse mediante el análisis de la distribución de velocidades de las moléculas en un material [164].

Por otro lado, el **calorímetro** es un dispositivo utilizado para medir los cambios de energía interna en función de la transferencia de energía térmica. Estos cambios pueden ser el resultado de una reacción química, una transformación física o variaciones de temperatura y calor específico [160]. La calorimetría es especialmente importante en el estudio del cemento hidráulico, ya que este material experimenta variaciones térmicas durante su proceso de hidratación, liberando energía exotérmica, un fenómeno particularmente notable durante las primeras 24 horas [165].

Las capacidades caloríficas típicas del cemento Portland sin hidratar se estiman en 0,75 J/(g·K), mientras que el agua presenta un valor de 4,18 J/(g·K). La masa térmica de una mezcla de cemento Portland y agua se obtiene mediante la ecuación:

$$Masa\ térmica = (0.75 \cdot A + 4.18 \cdot B) \text{ J/K}$$

donde A es la masa del cemento y B la masa del agua. Esta masa térmica representa la cantidad de energía térmica que puede almacenarse en el cemento hidratado [166], [167].

2.4.2.2 Normativas sobre calor de hidratación

Debido a su impacto en el desempeño del concreto, la norma ASTM C150/C150M (2022) establece el **calor de hidratación** como un parámetro clave de calidad. Los ensayos de calorimetría se realizan bajo condiciones **adiabáticas**, es decir, evitando la interacción térmica con el entorno. Para los Cementos Portland Tipo II, el valor máximo de calor de hidratación permitido es de 335 kJ/kg a los 3 días de edad. En el caso de los Cementos Portland Tipo IV, el límite es de 200 kJ/kg a los 3 días y 225 kJ/kg a los 7 días [168].

Por su parte, los cementos hidráulicos regulados por desempeño establecen límites diferentes:

- Para los **cementos MCH (Moderado Calor de Hidratación)**, el calor máximo de hidratación a los 7 días es de 335 kJ/kg.
- Para los **cementos BCH (Bajo Calor de Hidratación)**, los valores máximos permitidos son 200 kJ/kg a los 7 días y 225 kJ/kg a los 28 días [169].

Cuando la mezcla de concreto hidráulico contiene una cantidad significativa de cemento, la temperatura ambiente afecta directamente la reacción de hidratación, lo que presenta desafíos especiales en climas fríos y cálidos [170]. Estas variaciones térmicas influyen en el comportamiento

mecánico del pavimento, la contracción plástica, los esfuerzos totales y la evolución de resistencias con el tiempo, fenómeno conocido como madurez del concreto [171].

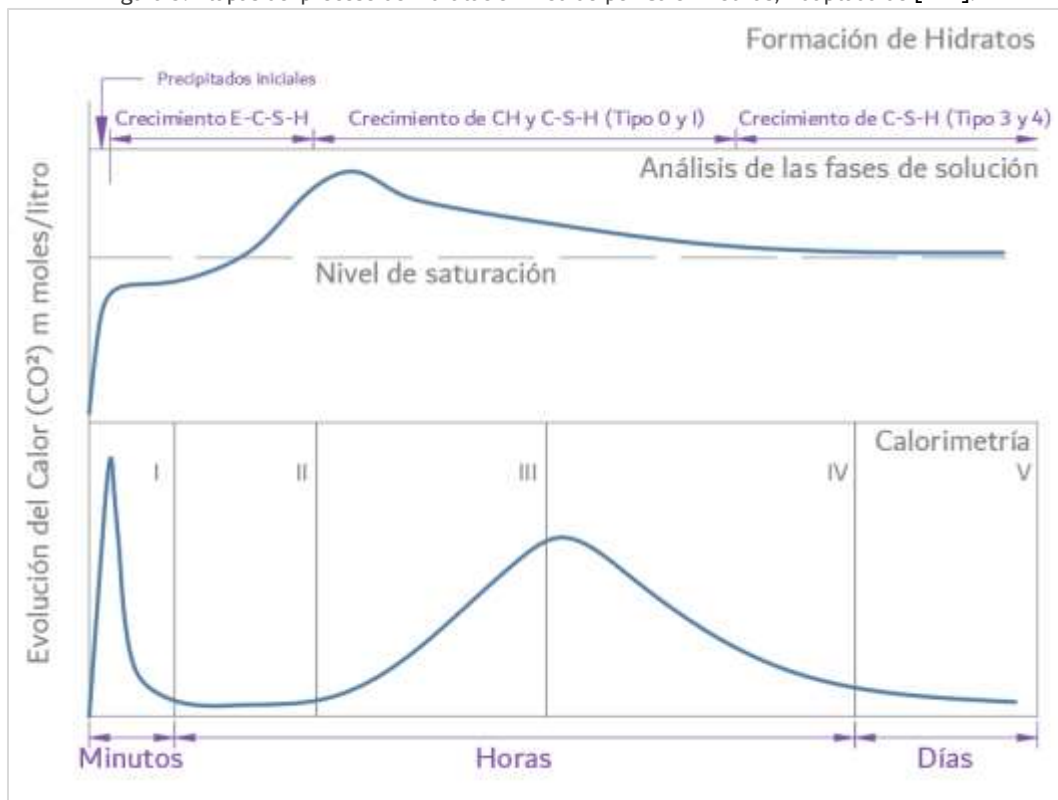
2.4.2.3 Desarrollo de temperaturas en el cemento hidráulico

El desarrollo de la temperatura en el concreto durante las primeras horas es un factor determinante en sus propiedades finales, incluyendo el endurecimiento, los esfuerzos internos y las retracciones. El calor liberado durante la hidratación del cemento es el principal responsable de la formación de enlaces químicos en este proceso, el cual se define como una reacción exotérmica compleja entre los compuestos del clinker, el sulfato de calcio, los aditivos minerales y el agua [172].

La técnica más utilizada para estudiar el proceso de hidratación del cemento Portland es la calorimetría isotérmica [173] , a través de la cual se han identificado cinco etapas principales:

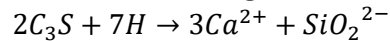
- I. Disolución
- II. Inducción
- III. Aceleración
- IV. Desaceleración
- V. Hidratación lenta continua

Figura 9. Etapas del proceso de hidratación medido por Calorimetrías, Adaptada de [174].



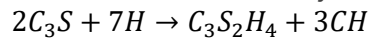
En la **etapa I**, se produce la disolución del C_3S en el agua, al mismo tiempo que se desarrolla la reacción del C_3A . En este proceso, se forma una capa de productos hidratados sobre la superficie de los granos de C_3A y, cuando esta capa se rompe, se genera monosulfoaluminato. La función del yeso en esta fase es retardar la formación de este compuesto y favorecer la formación inicial de etringita [168].

Ecuación 2. Disolución de agua en el cemento



Durante la **etapa II**, se forman los productos de hidratación principales: el **gel C-S-H** (*tobermorita*) y la portlandita ($Ca(OH)_2$), los cuales son responsables de la adherencia de la pasta a los agregados y del desarrollo de la resistencia mecánica [168].

Ecuación 3. Formación de Tobermorita y Portlandita



En la **etapa III** o **aceleración**, se intensifica la formación de $C-S-H$ y $Ca(OH)_2$, marcando el inicio del endurecimiento de la pasta. Este fraguado del cemento es controlado por la alita.

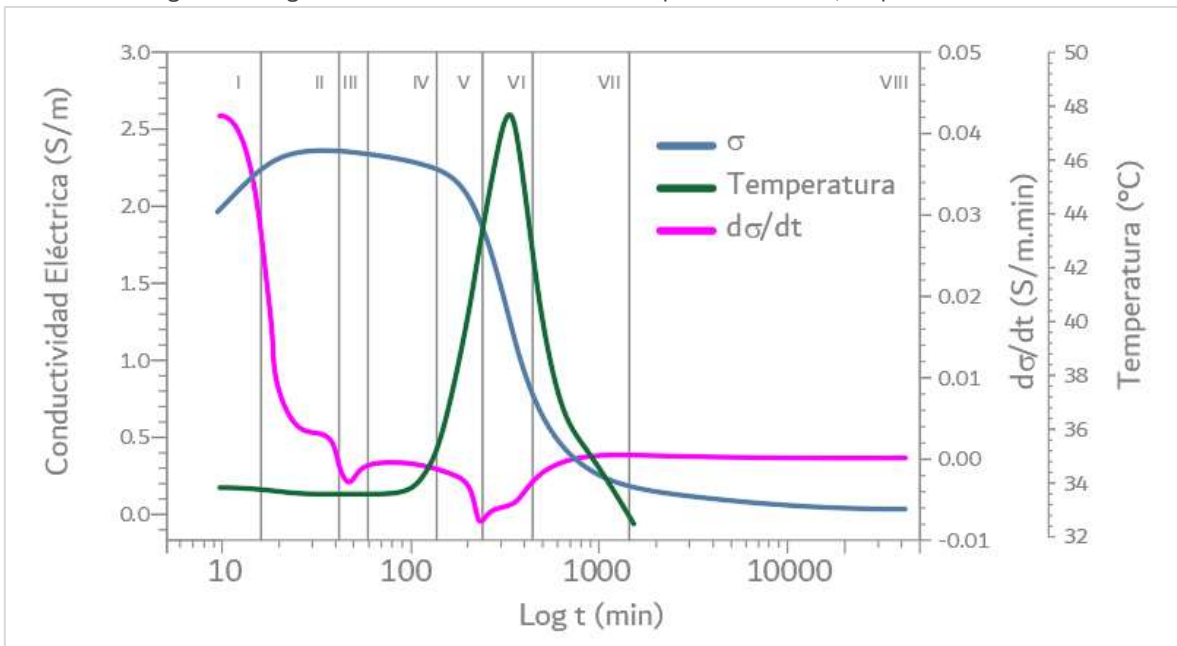
Durante la **etapa IV**, disminuye la concentración de calcio en la solución, lo que provoca la desaceleración de la reacción [172].

Finalmente, en la **etapa V** o **difusión**, los iones Ca^{2+} migran hacia zonas de menor concentración. Sin embargo, la estructura ya endurecida del gel $C-S-H$ restringe este desplazamiento, ralentizando el proceso. En esta fase, el curado es fundamental para facilitar la movilidad de los iones y mejorar la uniformidad de la mezcla [173].

2.4.2.4 Nuevos métodos para el estudio del proceso de hidratación

Si bien los procedimientos tradicionales han permitido caracterizar el proceso de hidratación del cemento, nuevas investigaciones han identificado etapas adicionales. Entre los métodos más innovadores destaca la espectroscopia de impedancia, la cual mide curvas de conductividad eléctrica y ha permitido dividir el proceso en ocho regiones diferenciadas [175].

Figura 10. Diagrama de conductividad eléctrica de la pasta de cemento, adaptada de [175].



En la **región I**, que comprende desde el tiempo 0 hasta los 16 minutos, la pasta de cemento se encuentra en estado coloidal. En esta fase, la alta concentración y movilidad de iones alcalinos (Ca^{2+} , SO_4^{2-} y OH^-) genera una elevada conductividad eléctrica (*línea magenta* en la Figura 10). En este punto, comienza la formación de hidratos en la superficie de los granos de cemento [175], [176].

En la **región II** (16-43 minutos), la conductividad térmica se reduce considerablemente. Aparecen geles de *C-S-H* y estructuras prismáticas de **sulfato de calcio hidratado** ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$).

Durante la **región III** (hasta los 58 minutos), se registran valores negativos de conductividad, lo que indica la formación de productos hidratados y la primera aparición de $Ca(OH)_2$ (*portlandita*) [177].

En la **región IV** (58-140 minutos), la conductividad se mantiene estable, mientras que disminuye la concentración de iones en la solución. En esta etapa, aumenta la producción de $Ca(OH)_2$ y se intensifica la deshidroxilación del hidróxido de calcio.

En la **región V**, la conductividad comienza a descender debido a la progresiva formación de productos de hidratación, la nucleación y el crecimiento de *C-S-H* en una segunda etapa. Durante esta fase se registra el fraguado inicial y final de la pasta, acompañado de un aumento de temperatura (*línea verde*) y una mayor producción de $Ca(OH)_2$ [178].

En la **región VI** (240-440 minutos), la conductividad eléctrica alcanza su mínimo valor, atribuido al cierre progresivo de los poros capilares. La hidratación se desacelera, mientras que las fases hidratadas *C-S-H* continúan creciendo, formando una microestructura más compacta [179].

En la **región VII** (hasta los 1440 minutos o 24 horas), la conductividad se estabiliza, lo que indica una reducción en la actividad química y el inicio del período de desaceleración de la hidratación del cemento Portland. A su vez, la temperatura interna de la pasta comienza a disminuir.

Finalmente, en la **región VIII**, la conductividad muestra una reducción lenta, lo que se asocia a cambios progresivos en la microestructura de la pasta, el crecimiento de cristales de $Ca(OH)_2$ y la densificación del gel $C-S-H$. En esta fase, la hidratación del cemento es controlada principalmente por difusión [176].

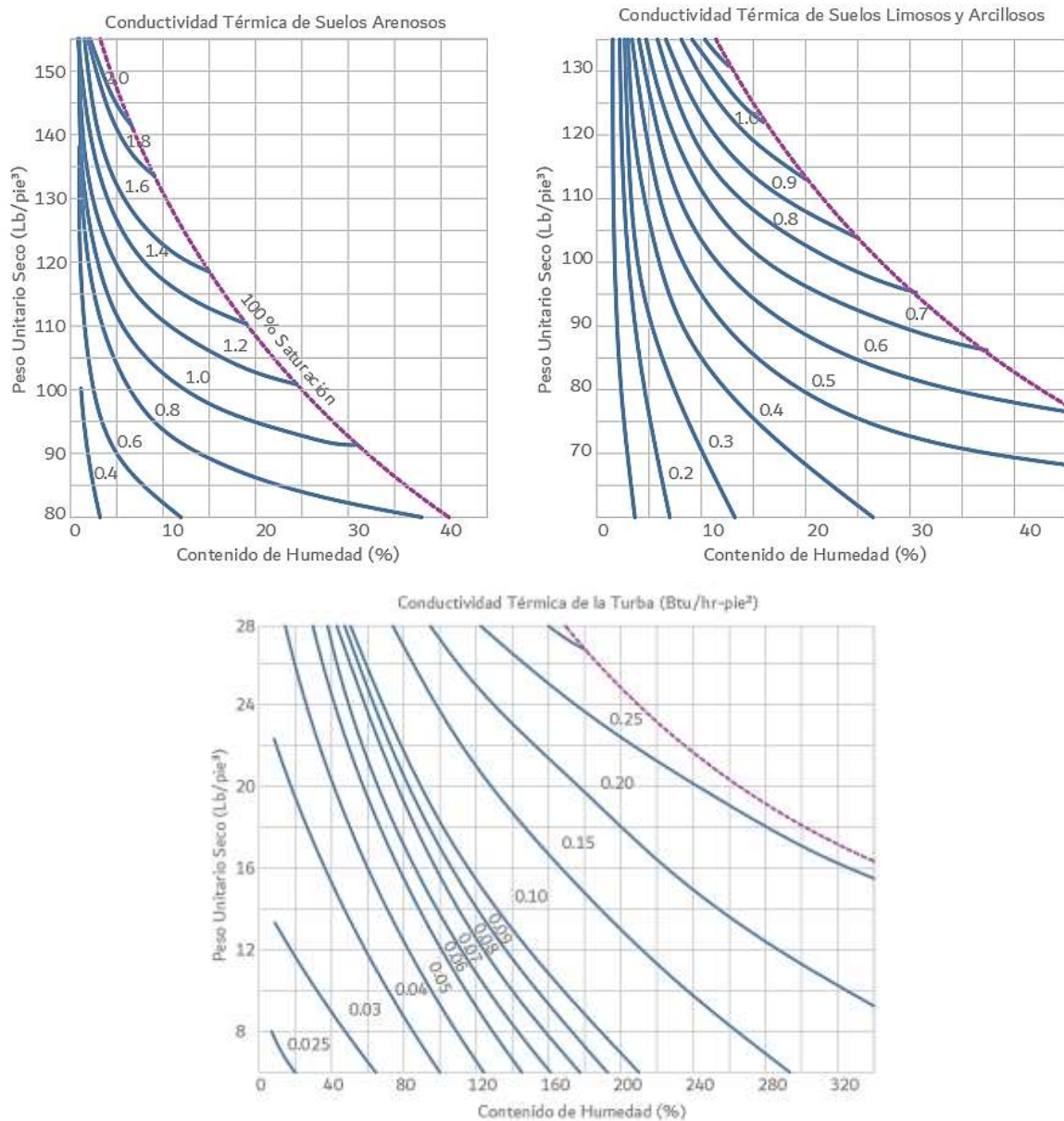
2.4.2.5 Conductividad térmica en los suelos cohesivos y arenosos

Luego de analizar los efectos de las reacciones exotérmicas en el cemento hidráulico, es importante considerar el papel de los agregados, en este caso los minerales de arcilla o suelos cohesivos, en la conductividad térmica del material. Estos presentan particularidades debido a factores como heterogeneidad, porosidad y saturación [180].

La **conductividad térmica** se define como la capacidad de un material para transferir calor por unidad de tiempo. En los suelos, este fenómeno está influenciado por diversas variables, incluyendo la densidad del suelo, el contenido de humedad, la temperatura, el estado del agua en los poros y la morfología de las partículas.

Para los suelos clasificados según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), se han establecido correlaciones entre la humedad y la conductividad térmica. En función de la densidad seca, se pueden definir parámetros que faciliten su predicción [181], [182].

Figura 11. Conductividad térmica de suelos arenosos, limosos, arcillosos y turbas, expresadas en Btu/hr-pie², adaptada de [182].



En la Figura 11, se presentan tres diagramas que correlacionan la densidad seca (*eje de ordenadas*) con el contenido de humedad en porcentaje (*eje de abscisas*) para tres tipos de suelos: arenosos, cohesivos y turbas. En todos los casos, las tendencias de la conductividad térmica finalizan en la línea punteada, la cual representa el 100% de saturación del suelo.

2.4.2.6 Efectos de la conductividad térmica en las mezclas de cementos hidráulicos con suelos cohesivos

Los resultados indican que la conductividad térmica de los suelos depende de su densidad y grado de saturación [183]. A su vez, la porosidad del suelo está relacionada con el grado de meteorización del regolito, su estructura, la actividad biológica y la cantidad de materia orgánica presente [184]. Por lo tanto, la edad y el tiempo de evolución del sustrato también afectan directamente sus propiedades térmicas.

Asimismo, en suelos porosos y húmedos sometidos a grandes cargas estructurales, los efectos de la consolidación y el endurecimiento por fluencia o flujo plástico pueden aumentar la conductividad térmica [185]. En el caso de pavimentos reciclados, la conductividad térmica tiende a incrementarse a medida que aumenta el contenido de humedad y la energía de compactación [185], [186].

Al comparar distintos materiales, por ejemplo, el cuarzo, que posee una estructura mineralógica bien definida, con mínima porosidad y sin contenido orgánico, puede registrar valores de conductividad térmica entre 4 y 7 W/m·K [187]. En contraste, un Vertisol, cuya estructura mineralógica es similar a la de una illita, con alta porosidad y grado de meteorización avanzado, presenta valores que varían entre 0,5 y 2 W/m·K [188].

Como se mencionó anteriormente, se ha comprobado que las mezclas de suelos cohesivos -también conocidos como saprolitos y vertisoles- con cemento hidráulico liberan un calor de hidratación tras el inicio de la reacción exotérmica [183]. Por lo tanto, se presume que a mayor contenido de cemento, mayor será la conductividad térmica y más significativo será el efecto del gradiente de temperatura en las mezclas de suelo-cemento.

Desde los años cincuenta, se ha identificado que a mayor temperatura de curado, mayor resistencia a la compresión en las mezclas de suelo-cemento [28]. Además, con un mayor contenido de cemento, se obtienen mejores propiedades mecánicas. Esto ha dado lugar a tendencias lineales que demuestran que aumentar tanto la cantidad de cemento como la temperatura de curado mejora la resistencia a la compresión [189]; [47]; [190].

En mezclas utilizadas en perforaciones profundas para la estabilización de estratos alterados por la minería [191] la temperatura ambiente se eleva debido a la entalpía, generando efectos térmicos similares a los observados en hormigones masivos [192]. En estos casos, las mayores resistencias se desarrollan en el núcleo, mientras que en la superficie la temperatura disminuye debido al enfriamiento por acción del viento y las condiciones climáticas.

Para estructuras sometidas a cargas cíclicas, como los pavimentos, se han realizado estudios que demuestran que Vertisoles altamente expansivos, como el *algodón negro* de la India, mejoran significativamente su resiliencia al mezclarse con cemento hidráulico [39]. Esta técnica ha sido ampliamente adoptada en estructuras de pavimentos, ya que mejora el módulo resiliente y la resistencia mecánica de entisoles, vertisoles y otros saprolitos, al ser combinados con cementos hidráulicos o materiales cementantes [22], [193], [194].

Para determinar el efecto de los gradientes de temperatura en las estructuras, es fundamental considerar cuatro variables clave:

- I. Conductividad térmica
- II. Calor específico
- III. Generación de calor
- IV. Condiciones ambientales [195].

Existen métodos estandarizados para medir la conductividad térmica, que definen la capacidad de un material para transmitir calor por conducción. Sin embargo, esta propiedad se ve afectada directamente por la presencia de agua intersticial [196], lo que hace más compleja su medición en sustratos y estructuras granulares en diferentes condiciones de humedad.

Las pruebas de exploración geotécnica, como la prueba de respuesta térmica (TRT) y la prueba de penetración de cono (CPT), se utilizan para medir la conductividad térmica del suelo en el sitio.

- En la **prueba CPT**, se aprovecha el calentamiento generado por la fricción entre el suelo y el cono a medida que el equipo penetra en el sustrato. Esto permite registrar la disipación del calor y, al detener el equipo, medir la velocidad de calentamiento del suelo para correlacionarla con su conductividad térmica. Aunque el principio del método es claro, los resultados aún requieren varios ajustes para mejorar su precisión [197].
- Por otro lado, la **prueba TRT** ha demostrado ser más confiable y aplicable, especialmente cuando se utilizan métodos de temperatura y flujo de calor constantes [198]. Además, la precisión de los resultados mejora al aplicar correcciones para la influencia de la temperatura ambiente [199] [200].

2.4.2.7 Energía geotérmica

La energía almacenada en forma de calor bajo la superficie terrestre varía en intensidad y se clasifica en función de su entalpía térmica:

- Muy baja entalpía: 5°C - 25°C
- Baja entalpía: 25°C - 100°C
- Entalpía media: 100°C - 150°C
- Alta entalpía: >150°C [201]

El potencial para desarrollar proyectos geotérmicos que reemplacen el uso de combustibles fósiles depende del nivel de entalpía presente en fallas geológicas y sistemas volcánicos activos[202].

Gracias a los procesos geodinámicos de la Tierra, el calor generado en el interior del planeta se transfiere lentamente hacia la superficie. Además de este calor interno, la superficie terrestre recibe aproximadamente 2×10^{17} julios por segundo de radiación solar. Sin embargo, la conducción térmica de las rocas y la interacción entre partículas sólidas, líquidas y gaseosas hacen que la transferencia de calor desde el interior del planeta sea un proceso lento [203].

A pesar de su capacidad para generar energía eléctrica, el desarrollo de la energía geotérmica ha avanzado a un ritmo relativamente lento. Desde la construcción de los primeros pozos geotérmicos en Japón (1919), Estados Unidos (1921) e Islandia (1930), su implementación global ha sido gradual [203].

Uno de los principales desafíos para su expansión radica en la variabilidad de las propiedades fisicoquímicas de los fluidos geotérmicos en circulación profunda. Estas propiedades pueden cambiar según el régimen térmico, el flujo de calor, la resistencia del medio y las características litológicas y químicas. Además, factores como el tectonismo activo y el magmatismo, asociados a los límites de placas tectónicas y la actividad volcánica, dificultan la evaluación de estos sistemas únicamente a partir de su contenido de arsénico [204].

No obstante, han surgido nuevas oportunidades para el aprovechamiento de esta fuente de energía. Los campos petroleros abandonados han sido identificados como posibles fuentes de energía geotérmica en el futuro [205]. Por otro lado, los pavimentos geotérmicos han demostrado ser una alternativa eficiente y sostenible, con un rendimiento de 50 W/m² de superficie pavimentada, dependiendo de la temperatura ambiente [200] Esta tecnología representa una opción prometedora para reducir costos en el desarrollo de infraestructuras resilientes al cambio climático.

2.4.3 Marco contextual

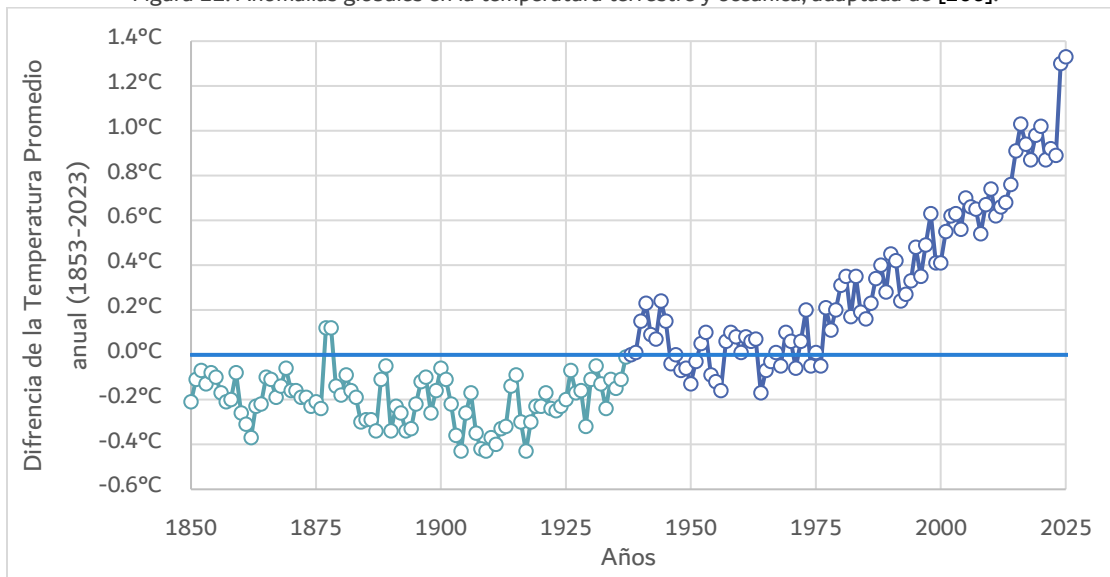
Según las predicciones del observatorio de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), los incrementos anuales en la temperatura global y la tasa de calentamiento desde 1982 han sido tres veces más rápidos que en períodos anteriores. El año 2024 fue el más cálido registrado hasta la fecha, y este aumento de temperatura ha generado condiciones extremas, una reducción en

la capa de nieve y el hielo marino, así como modificaciones en los hábitats de diversas especies de plantas y animales [206].

2.4.3.1 Variación de la temperatura ambiente

Como se observa en la Figura 12, los datos registrados entre 1850 y 1930 muestran que la temperatura global presentaba variaciones negativas y su promedio se mantenía estable. Sin embargo, desde la década de 1940, los incrementos comenzaron a acelerarse de manera exponencial, lo que ha resultado en un aumento de aproximadamente $1,3^{\circ}\text{C}$ en la temperatura global. Aunque este cambio pueda parecer pequeño, representa una acumulación significativa de calor, considerando que la capacidad calorífica de los océanos mitiga gran parte del calor de la superficie terrestre.

Figura 12. Anomalías globales en la temperatura terrestre y oceánica, adaptada de [206].



Dado que el clima terrestre está impulsado por la energía térmica de la atmósfera mediante procesos de convección, el calor generado en estructuras de concreto expuestas a condiciones climáticas extremas, como los pavimentos, no proviene únicamente de reacciones exotérmicas. La transferencia de calor desde estas estructuras hacia el ambiente se suma al calor adicional recibido del exterior, lo que resalta la importancia de analizar la resiliencia de las infraestructuras ante los efectos del calentamiento global.

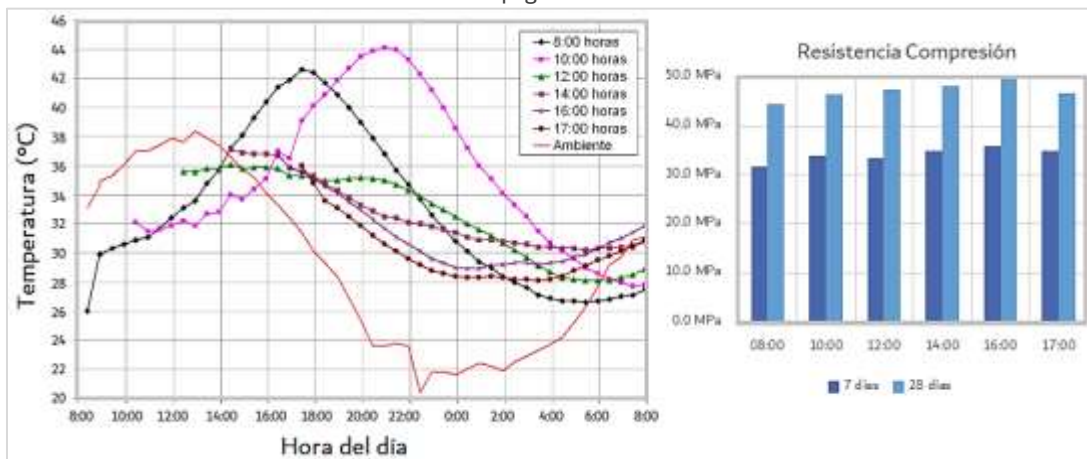
Por esta razón, se han desarrollado diversos simuladores para evaluar cómo influyen el diseño del pavimento, la composición de la mezcla de concreto y los métodos de construcción en su desempeño bajo condiciones ambientales reales. Estos estudios se centran en el comportamiento del material en edades tempranas, ya que la vida útil de los pavimentos de concreto hidráulico depende en gran medida del proceso de curado durante las primeras 72 horas posteriores a su instalación.

2.4.3.2 Efecto de la temperatura ambiente sobre la resistencia

Las tensiones en el hormigón se generan debido a la combinación de rugosidad, alabeo y fricción entre las capas de soporte y la losa. Si estas tensiones alcanzan una magnitud suficiente, pueden provocar agrietamiento antes de que el hormigón haya desarrollado una resistencia adecuada [207]. Por esta razón, la predicción y monitoreo de estas tensiones en las primeras etapas del curado es crucial, ya que las condiciones ambientales, sumadas a los procesos de curado, pueden afectar la durabilidad de la estructura.

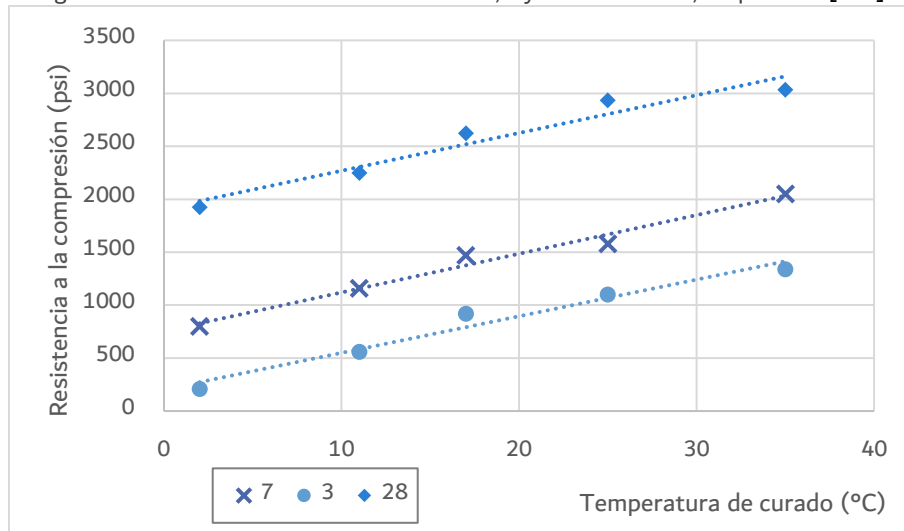
Como se muestra en la Figura 13, la temperatura ambiente influye directamente en la evolución térmica del concreto. En un estudio realizado en Cataluña, España, se observó que un concreto vaciado a las 10:00 a.m. con una temperatura ambiente de 36°C presentó un incremento más rápido en su temperatura interna en comparación con otro concreto preparado a las 17:00 horas, cuya curva térmica mostró un retraso hasta el día siguiente. Este fenómeno indica que las etapas iniciales de hidratación del cemento fueron más prolongadas en el concreto vaciado a menor temperatura, lo que resultó en una mayor producción de iones de calcio y, en consecuencia, en un desarrollo de resistencias más elevado a los 7 y 28 días [208].

Figura 13. Perfiles térmicos de concretos para pavimentos fabricados a diferentes horas del día, adaptada de [208]
página 31.



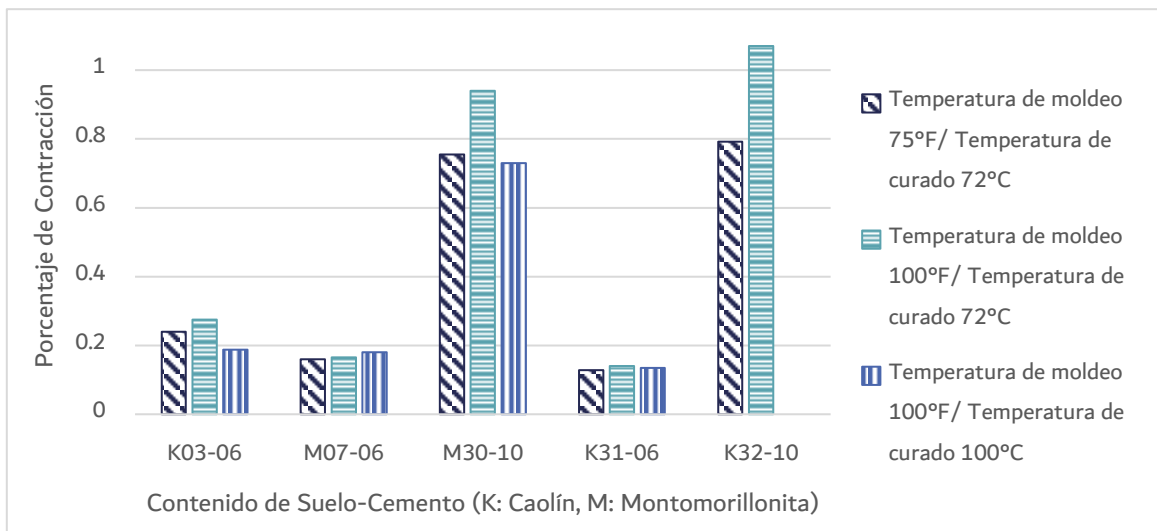
Desde la década de 1950, se ha investigado el efecto de la temperatura en la resistencia a la compresión de las mezclas de suelo-cemento, especialmente en pavimentos. Se ha determinado que en climas tropicales, se requiere menos cemento Portland para alcanzar la misma resistencia que en climas templados. Estudios han establecido que la tasa de incremento de resistencia a los 7 días de edad es del 2% al 2,5% por cada grado centígrado adicional en la temperatura de curado [28].

Figura 14. Resistencia de suelo cemento a los 3, 7 y 28 días de edad, adaptada de [209].



Aunque estos estudios utilizaron muestras de suelo-cemento con grava, arena limpia, arena orgánica, arcilla limosa y arcilla del sur de Inglaterra, se identificó que la contracción del suelo-cemento se intensifica cuando el fraguado ocurre rápidamente. Esto se debe a que el curado a altas temperaturas favorece una configuración temprana con una matriz de cemento estructuralmente débil, lo que aumenta la susceptibilidad al cambio volumétrico.

Figura 15. Relación de contracción del suelo-cemento, adaptada de [210].



En climas cálidos, los efectos de contracción se intensifican debido a la mayor tasa de evaporación del agua. Esto, combinado con la estructura reticular expansiva de las arcillas, sugiere que la contracción resulta de múltiples factores:

1. Hidratación del cemento, que puede absorber hasta el 42% del agua en peso.

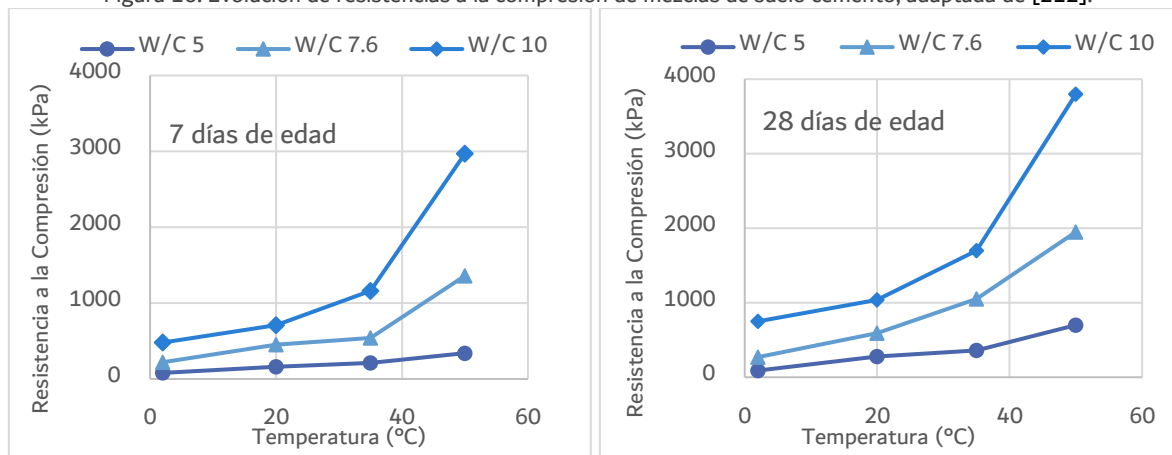
2. Contenido y tipo de arcilla, ya que su comportamiento varía. Por ejemplo, la montmorillonita genera mayor contracción que la caolinita debido a su mayor retención de humedad y menor compactación [210].

En la explotación minera subterránea, los rellenos de pasta cementada requieren un análisis detallado de la evolución de resistencias en función de la temperatura de curado. Estudios en minas canadienses han mostrado que estas mezclas pueden alcanzar temperaturas de hasta 400°C, debido a:

- Reacciones exotérmicas de minerales sulfurosos, como pirofita y pirita.
- Temperaturas generadas por operaciones mineras, incluyendo voladuras, ventilación, iluminación y transporte de relaves [211].

El incremento térmico durante el curado de la mezcla mejora la resistencia a la compresión, la tracción y la durabilidad, reduciendo el consumo de aglutinantes.

Figura 16. Evolución de resistencias a la compresión de mezclas de suelo cemento, adaptada de [212].

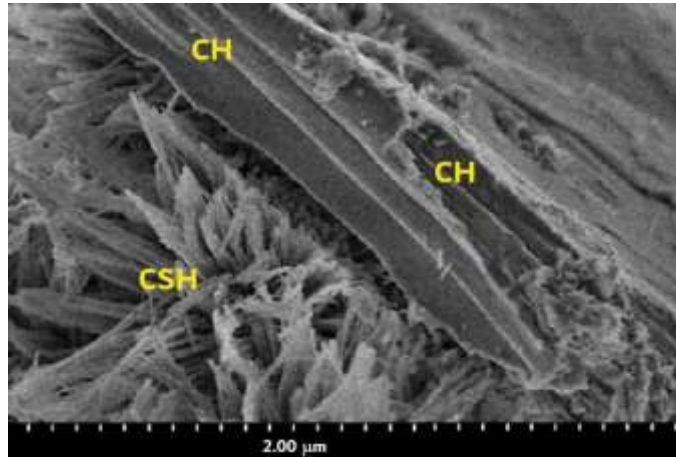


Asimismo, como se observa en la imagen SEM de la

Figura 17, a mayor temperatura de curado (35°C), la intensidad del C-H es superior en comparación con las muestras curadas a 20°C. Los análisis de XRD no evidencian la presencia de C_2S y C_3S , pero sí confirman la formación de productos CH y C-S-H, lo que indica una hidratación completa del clinker [212].

En el caso de mezclas de suelo con cemento y agentes espumantes, utilizadas en terraplenes aligerados, el comportamiento mecánico mejora solo dentro de un rango de temperatura específico.

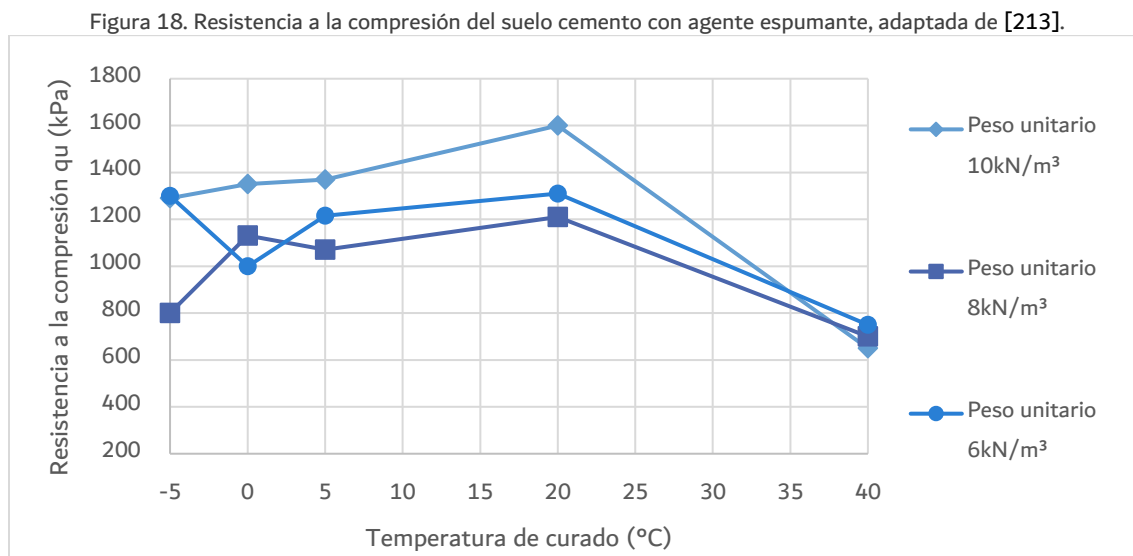
Figura 17. Cristales de CSH y CH en cemento curado a altas temperaturas por 90 días, adaptada de [211].



Como se muestra en la Figura 18, las resistencias a la compresión confinada de tres mezclas de suelo-cemento ligero indican que solo dentro del rango de 5°C a 25°C se logra una resistencia adecuada. Fuera de este intervalo, la resistencia disminuye [213]. Además, se observó que:

- A temperaturas inferiores a **5°C**, las muestras se contrajeron hasta 10 mm en 28 días.
- A temperaturas de **40°C**, las muestras se expandieron hasta 6 mm.

Estos resultados sugieren que la densidad de la mezcla también influye en la resistencia, ya que el contenido de agente espumante modifica la cantidad de vacíos y, por lo tanto, la evolución de resistencias.



El suelo-cemento es un material híbrido que no puede evaluarse exactamente como un concreto, debido a su capacidad de recuperación estructural (tixotropía) después del remoldeo. Investigaciones

realizadas por Zhang y otros han demostrado que el curado a mayor temperatura no solo acelera la resistencia en edades tempranas, sino que también mejora la resistencia a largo plazo.

La resistencia del suelo-cemento a una edad definida t se puede predecir mediante la siguiente ecuación:

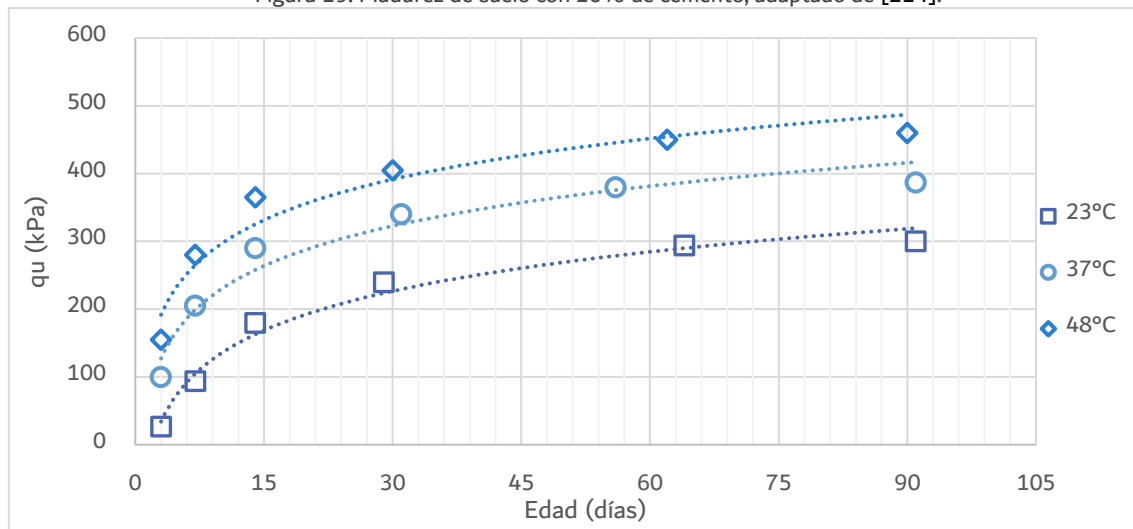
Ecuación 4. Predicción de la resistencia a la compresión no confinada

$$q_u(t, T) = \eta' T \{ a \cdot [\ln(t) + a'_T] + b \} \quad [214]$$

Donde :

- a y b son constantes dependientes del contenido de cemento en la mezcla.
- $a'T$ está relacionado con la activación térmica de la arcilla.
- η representa la porosidad de la mezcla [214].

Figura 19. Madurez de suelo con 10% de cemento, adaptado de [214].



Las micrografías SEM presentadas en la Figura 20, tomadas en mezclas de suelo-cemento, evidencian una estructura con grandes grumos de partículas de suelo interconectadas con poros, tanto en los suelos sin tratar (*Figura 20a*) como en los tratados con aglomerante (*Figura 20b*).

En las muestras tratadas, se observa que las partículas del suelo están recubiertas por cal, adoptando una tonalidad blanquecina, mientras que los iones Ca^{2+} interactúan con el gel del aglutinante, generando pequeñas zonas de reacción alrededor de partículas finas del suelo. En la Figura 20c, se ilustra cómo la reacción puzolánica y la hidratación del cemento dan lugar a la formación de materiales cementosos, como los geles C-S-H ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) y C-A-H ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaOH}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$).

En el caso de mezclas de suelo con cemento y agentes espumantes, utilizadas en terraplenes aligerados, el comportamiento mecánico mejora solo dentro de un rango de temperatura específico.

Como se muestra en la Figura 18, las resistencias a la compresión inconfiada de tres mezclas de suelo-cemento ligero indican que solo dentro del rango de 5°C a 25°C se logra una resistencia adecuada. Fuera de este intervalo, la resistencia disminuye [213]. Además, se observó que a temperaturas inferiores a 5°C, las muestras se contrajeron hasta 10 mm en 28 días. Mientras que a temperaturas de 40°C, las muestras se expandieron hasta 6 mm.

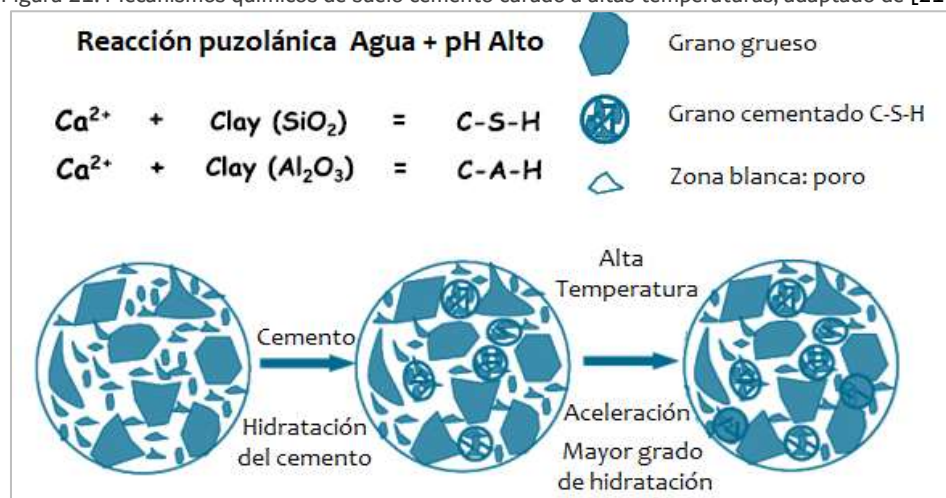
Estos resultados sugieren que la densidad de la mezcla también influye en la resistencia, ya que el contenido de agente espumante modifica la cantidad de vacíos y, por lo tanto, la evolución de resistencias.

Figura 20. Micrografías electrónicas de barrido de muestras de suelo estabilizado, adaptado de [215].



Wang y otros explican este mecanismo en el esquema de la Figura 21, que muestra cómo el intercambio de cationes y la reacción puzolánica en la mezcla suelo-cemento se aceleran a altas temperaturas.

Figura 21. Mecanismos químicos de suelo cemento curado a altas temperaturas, adaptado de [215].

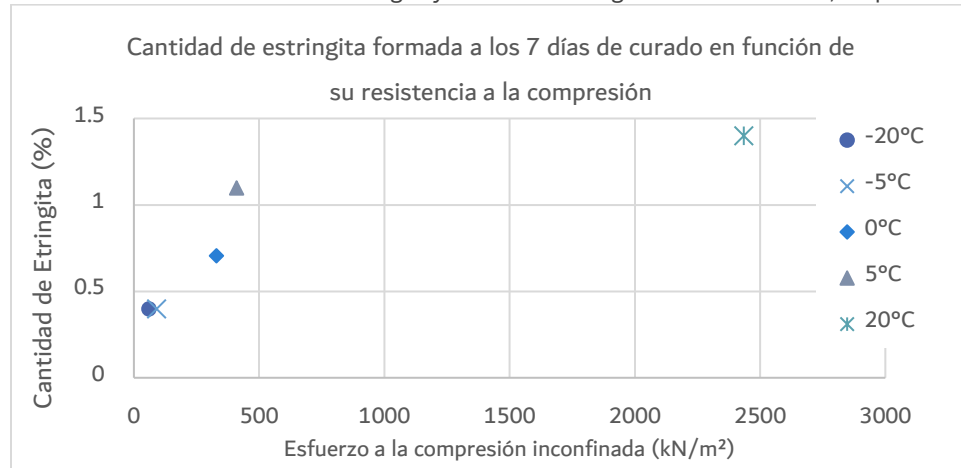


En este proceso, el catión calcio (Ca^{2+}) suministrado por CaO reemplaza los cationes de Na^+ y K^+ presentes en el suelo, modificando sus propiedades en el corto plazo. Se ha demostrado que, cuando la temperatura de curado supera los 40°C , la reacción puzolánica entre SiO_2 y Al_2O_3 con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ genera una mayor cantidad de geles C-S-H y C-A-H en un tiempo reducido, permitiendo que las partículas individuales se unan y formen una estructura más sólida [215].

Durante el proceso de hidratación del cemento en suelo-cemento, se produce etringita ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot12\text{H}_2\text{O}$), cuya formación ha sido medida mediante difracción de rayos X (XRD).

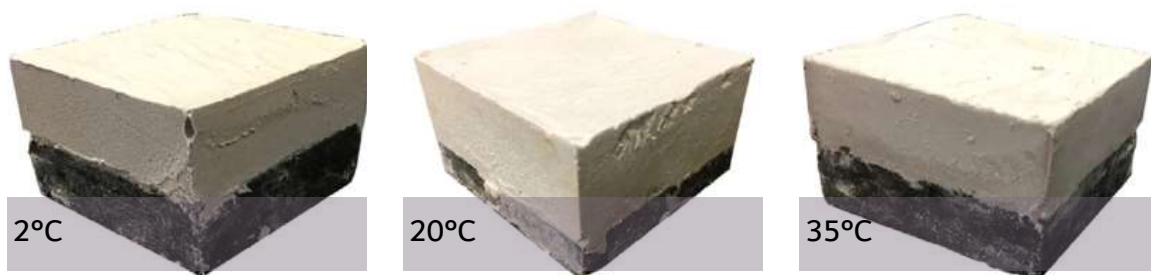
Los resultados indican que, tras 7 días de curado a diferentes temperaturas, el desarrollo de resistencias fue menor a bajas temperaturas, debido a una producción restringida de etringita. En contraste, a mayores temperaturas de curado, la cantidad de etringita y la resistencia a la compresión aumentaron significativamente [216] (*Figura 22*).

Figura 22. Relación entre la cantidad de etringita y la resistencia luego de 7 días de curado, adaptado de [216].



El suelo-cemento alcanza una madurez estructural conforme las partículas mezcladas y homogenizadas adquieren mayor resistencia con el curado a altas temperaturas. Como resultado, la matriz del suelo alterada con cemento se transforma en una roca artificial, adecuada para el reforzamiento de estructuras de fundación y carreteras.

Figura 23. Muestras relaves de sílice con cemento (CPB) almacenados en diferentes temperaturas, adaptado de [217].



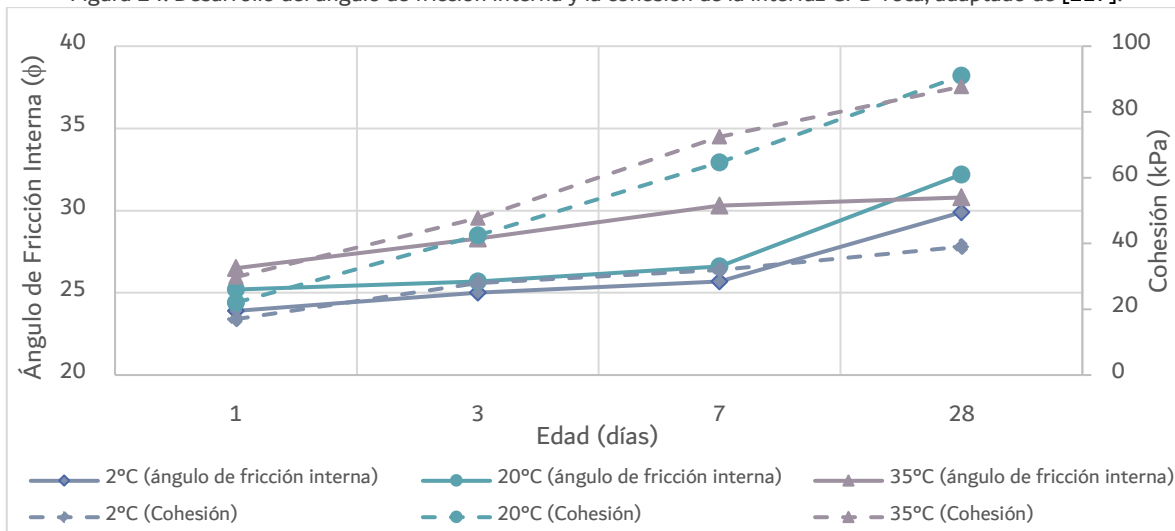
Sin embargo, para evaluar la adherencia entre el suelo-cemento y los suelos subyacentes no tratados, Fang & Fall [217] estudiaron el cizallamiento entre el suelo-cemento utilizado como relleno de pasta cementada (CPB) y suelos de relaves naturales de minas en Canadá, así como su interacción con capas subyacentes no tratadas (Figura 23).

Los resultados indicaron que la temperatura de curado tiene un impacto significativo en el comportamiento de corte entre la superficie de la roca natural y el CPB, ya que mejora:

- La tasa de hidratación.
- La auto-dsecación del cemento.
- La fricción entre capas.
- El ángulo de fricción interna.
- La cohesión de la interfaz (Figura 23).

En mezclas de suelo-cemento con relaves, cuando es necesario aumentar la fluidez sin perder cohesión, se emplean aditivos superplastificantes de alto rango, según la norma ASTM C494/C494M [218].

Figura 24. Desarrollo del ángulo de fricción interna y la cohesión de la interfaz CPB-roca, adaptado de [217].



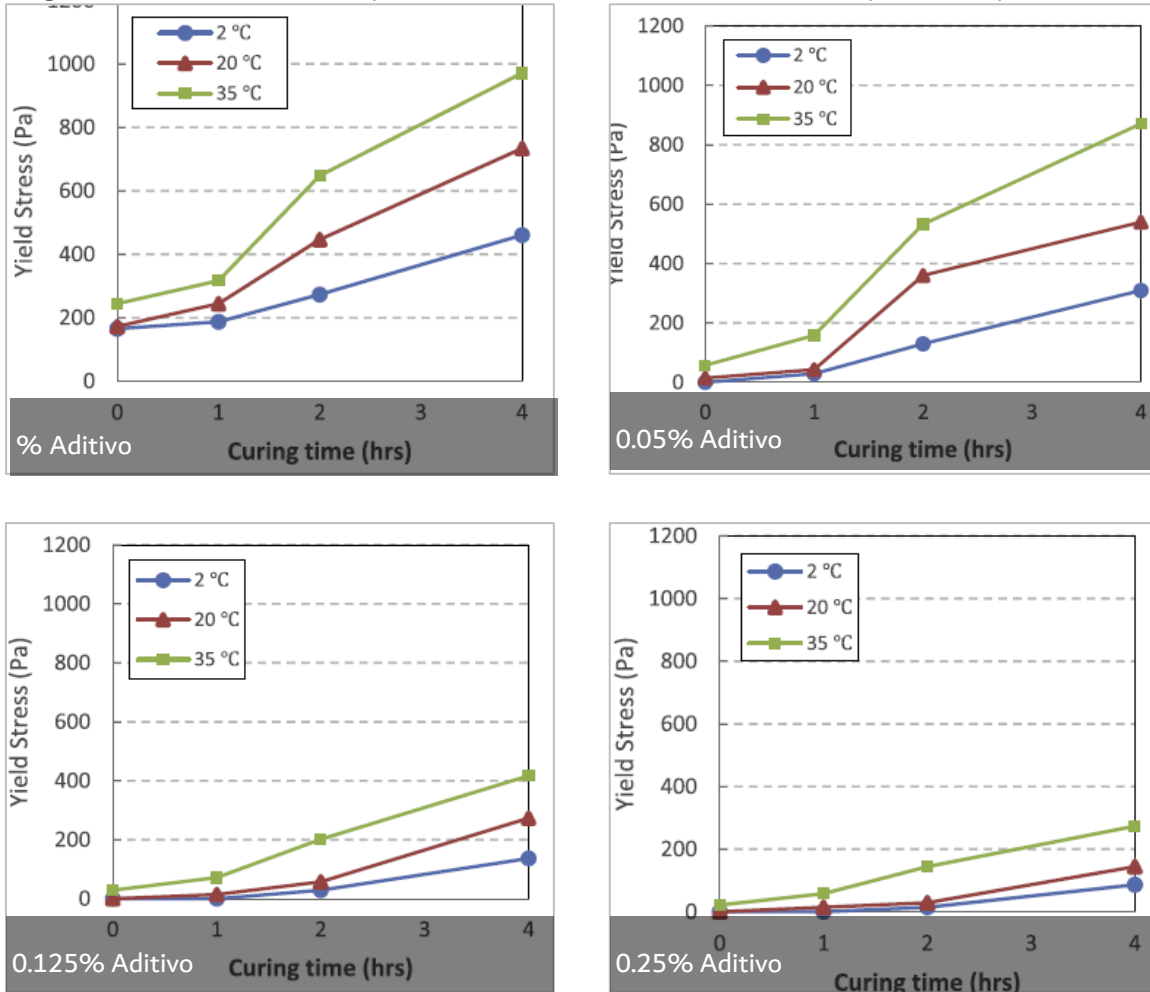
Sin embargo, estudios de Haruna y Fall han demostrado que, aunque los superplastificantes mejoran la trabajabilidad, también reducen la velocidad de evolución de resistencias, dependiendo de la temperatura de curado (Figura 25).

Los resultados mostraron que:

- Tanto la viscosidad como el límite elástico del suelo-cemento aumentaron con el tiempo, con cambios más rápidos en mezclas sin aditivo.

- La adición de superplastificante redujo el límite elástico hasta en un 50% con una dosis de 0.125%.
- Aunque la temperatura influye en la resistencia, las muestras con aditivo mostraron un desarrollo de resistencia inferior a las mezclas sin aditivo [219].

Figura 25. Límite elástico en el tiempo de relaves con cemento curados a diferente temperatura, adaptada de [219].



En la producción de suelo-cemento, existe la posibilidad de utilizar cementos hidráulicos con diferentes proporciones de clinker y puzolanas, lo que influye en la cantidad de calor liberada durante la reacción exotérmica [220].

Un estudio analizó la relación entre la temperatura monitoreada en muestras de suelo-cemento preparadas con diferentes tipos de cemento y su módulo resiliente a los 28 días de edad. Se compararon cemento de uso general (UG), cemento de altas resistencias tempranas (ART) y cemento de moderado calor de hidratación (MCH).

Las muestras fueron curadas a 10°C, 30°C y 40°C. Los resultados indicaron que, independientemente del tipo de cemento, cuanto mayor fue el incremento de temperatura en las primeras 30 horas, mayor fue el módulo resiliente final [221].

2.4.4 Marco legal

La necesidad de aprovechar los materiales disponibles en las zonas de intervención para el mejoramiento, construcción o rehabilitación de carreteras ha impulsado esta alternativa a nivel mundial, ofreciendo buenos resultados tanto mecánicos como ambientales y económicos [222].

Sin embargo, para definir los criterios de selección del suelo a estabilizar, es fundamental identificar un volumen suficiente de material con mínima variabilidad en sus características iniciales, tales como:

- Distribución granulométrica.
- Mineralogía de las partículas de arcilla.
- Tipo y porcentaje de material orgánico presente.
- Contaminantes provenientes de aguas subterráneas [223].

2.4.4.1 Reglamentación para pavimentos con suelo cemento

Diversos estudios de caso han demostrado que la construcción de carreteras sobre suelos naturales mezclados con cemento mejora significativamente el desempeño estructural del pavimento. Entre los beneficios más relevantes se encuentran:

- Aumento de la capacidad de carga vehicular.
- Mayor resistencia al ablandamiento por agua, debido a la unión química entre partículas.
- Reducción de esfuerzos a tracción por tráfico, lo que mejora la durabilidad.
- Disminución de los espesores en la estructura del pavimento, optimizando costos de construcción [224] [225] [226].

El Instituto Americano del Concreto (ACI), en su informe 230.1R-09, establece los lineamientos para el diseño, construcción e inspección del suelo-cemento. Estos criterios son ratificados por la Portland Cement Association (PCA) en su guía para la estabilización de suelos, donde se define el suelo-cemento como una mezcla compacta de suelo, cemento Portland o hidráulico y agua, utilizada en pavimentos y cimentaciones [227] [228] .

La clasificación del suelo-cemento según la ACI y la PCA se divide en cuatro tipos principales:

1. Suelo modificado con cemento (CMS).
2. Subrasante estabilizada con cemento (CSS).
3. Base tratada con cemento (CTB).

4. Recuperación total de profundidad (FDR).

Suelo modificado con cemento (CMS)

El CMS está compuesto por suelos finos naturales de baja plasticidad, con bajas dosificaciones de cemento hidráulico y agua. Su función principal es:

- Mejorar la trabajabilidad del suelo.
- Reducir la humedad y acelerar la construcción en zonas lluviosas.
- Aumentar la capacidad de carga de forma permanente.

En este caso, el material no requiere un período de maduración antes de ser sometido a carga, y su resistencia de diseño a los 7 días es relativamente baja, en el rango de 100 a 300 psi.

Subrasante estabilizada con cemento (CSS)

El CSS contiene una mayor proporción de cemento que el CMS, ya que su objetivo es:

- Incrementar la capacidad de soporte (CBR).
- Mejorar la resistencia al corte y a la compresión.
- Minimizar deformaciones por ciclos de humedecimiento y secado.

Al formar parte de la estructura del pavimento, el CSS proporciona una base más resistente para soportar el tráfico.

Base tratada con cemento (CTB)

El CTB es una mezcla de suelo manufacturado, con una gradación controlada, mayor contenido de cemento que el CMS y agua. Puede prepararse en sitio o en planta, y su resistencia a compresión a los 7 días varía entre 300 y 600 psi [226].

Recuperación total de profundidad (FDR)

El FDR consiste en el reciclaje de pavimentos deteriorados mediante fresado, trituración y pulverización de la superficie de rodadura y las capas inferiores (bases granulares o subrasantes).

Este material se mezcla con cemento y agua, obteniendo una capa compacta homogénea, con buenas propiedades estructurales, reducción de costos y beneficios ambientales, gracias al reaprovechamiento de materiales [229].

La PCA recomienda un modelo para el diseño de mezclas de suelo-cemento basado en la caracterización del suelo, el porcentaje de compactación y la resistencia a la compresión confinada [230]. Por su parte, la Asociación Americana de funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte (AASHTO) define los métodos de diseño a partir de ensayos de Relación Humedad/densidad T134 [231], ciclos de humedecimiento y secado T135 [232] y ciclos de congelamiento y descongelamiento (Hielo y deshielo) T136 [233].

El objetivo del diseño de mezclas de suelo-cemento es mejorar las propiedades mecánicas del suelo natural. Sin embargo, para garantizar una base y subbase estabilizadas con cemento, se deben cumplir estándares específicos.

AASHTO, en conjunto con la Asociación de Contratistas Generales (AGC) y la Asociación Estadounidense de Constructores de Carreteras y Transportes (ARTBA), desarrolló la Especificación de Guía para la Producción de Base o Subbase de Mezcla Estabilizada Puzolánica (PSM), actualmente adoptada por la Administración Federal de Carreteras (FHWA) [234].

Tabla 3. Procedimientos de prueba para mezclas de base y subbase con cemento, adaptado de [234].

Propiedad	Estándar	Método de prueba	Método
Gradación	%Pasa No. 4>50%	Análisis por tamizado de agregados finos y gruesos	ASTM C136 / AASHTO T27
Resistencia a la abrasión	Suficiente resistencia a las partículas para resistir la degradación y la ruptura durante la construcción y bajo cargas de tráfico repetidas	Resistencia a la degradación del agregado grueso de tamaño pequeño por abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles	ASTM C131 / AASHTO T96
Plasticidad	LL<25% IP<4%	Límite líquido, índice de plasticidad plástica de suelos	ASTM D4318
Sustancias nocivas	Los agregados utilizados en mezclas de bases y subbase estabilizadas deben estar razonablemente libres de sustancias nocivas, como arcilla, esquisto, carbón, coque, vegetación u otros desechos.	Solidez de los agregados mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio	ASTM C88 / AASHTO T104
Componentes perjudiciales	Valor equivalente de arena de suelos y agregados finos (medida indirecta del contenido de arcilla de las mezclas de agregados)		ASTM D2419
	Cenizas volantes y otras puzolanas para usar con cal		ASTM C593
Resistencia a la compresión	Fabricación y curado de muestras de ensayo de compresión y flexión de suelo-cemento en el laboratorio		ASTM D1632
	Cenizas volantes y otras puzolanas para usar con cal		ASTM C593

Propiedad	Estándar	Método de prueba	Método
Durabilidad de congelación-descongelación	Pruebas de congelación y descongelación de mezclas compactadas de suelo y cemento		ASTM D560
Densidad seca máxima y contenido óptimo de humedad	Relaciones humedad-densidad de suelos y mezclas de suelo-áridos utilizando un apisonador de 2,49 kg (5,5 lb) y una caída de 305 mm (12 pulg) o Relaciones humedad-densidad de suelos y mezclas de suelo-áridos utilizando un apisonador de 10 lb (4,59 kg) y una caída de 18 in (457 mm)		ASTM D698 (estándar) o ASTM D1557 (modificado)
Densidad compacta	Densidad del suelo en el lugar por el método del cono de arena		ASTM D1556
	Densidad y peso unitario del suelo colocado mediante el método del globo de goma		ASTM D2167
Estabilidad volumétrica	Expansión unidimensional, contracción y aumento de la presión de las mezclas suelo-cal		ASTM D3877
Módulo resiliente	Módulo resiliente de materiales de base / subbase granulares no unidos y suelos de subrasante		AASHTO T274

De manera similar, la norma europea BS EN 14227-15:2015 regula la dosificación, construcción y control de calidad de mezclas de suelos ligadas hidráulicamente para carreteras, aeródromos y otras áreas de tráfico, basándose en los mismos parámetros de la Tabla 3.

Esta norma abarca la estabilización de suelos mediante el uso de uno o una combinación de los siguientes materiales: cemento, cenizas volantes, aglutinante de carreteras hidráulico, cal y escoria de alto horno [235].

2.4.4.2 Reglamentación para la elaboración de muestras y diseños de mezclas de suelo cemento

Los efectos mecánicos de las mezclas de suelo-cemento han sido ampliamente aplicados en el mejoramiento de fundaciones, especialmente mediante el método de mezcla profunda (DMM, Deep Mixing Method).

Este método consiste en la estabilización de suelos blandos en estratos profundos, utilizando la aplicación, mezcla y homogenización de materiales como:

- Cal.
- Cemento.

- Aglutinantes especiales a base de cal y cemento.

La Sociedad Internacional de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica (ISSMGE) ha liderado investigaciones y eventos de divulgación que demuestran la versatilidad y eficacia de esta técnica [236-241].

Desde 1975 hasta 2010, el volumen total de suelo estabilizado mediante DMM en Japón alcanzó los 104.4 millones de m³, lo que ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías, optimizando rendimientos y mejorando la capacidad portante de estructuras más robustas [242], [243] [244].

Para predecir el comportamiento mecánico del suelo-cemento ante los cambios de temperatura, es fundamental considerar la consistencia de la mezcla (fluidez) en función de la relación agua-cemento en el diseño de la mezcla [245].

Curiosamente, las normas técnicas para el diseño de mezclas de suelo-cemento emplean diferentes métodos de compactación, lo que genera variabilidad en los resultados de la densidad, la porosidad y la relación de vacíos.

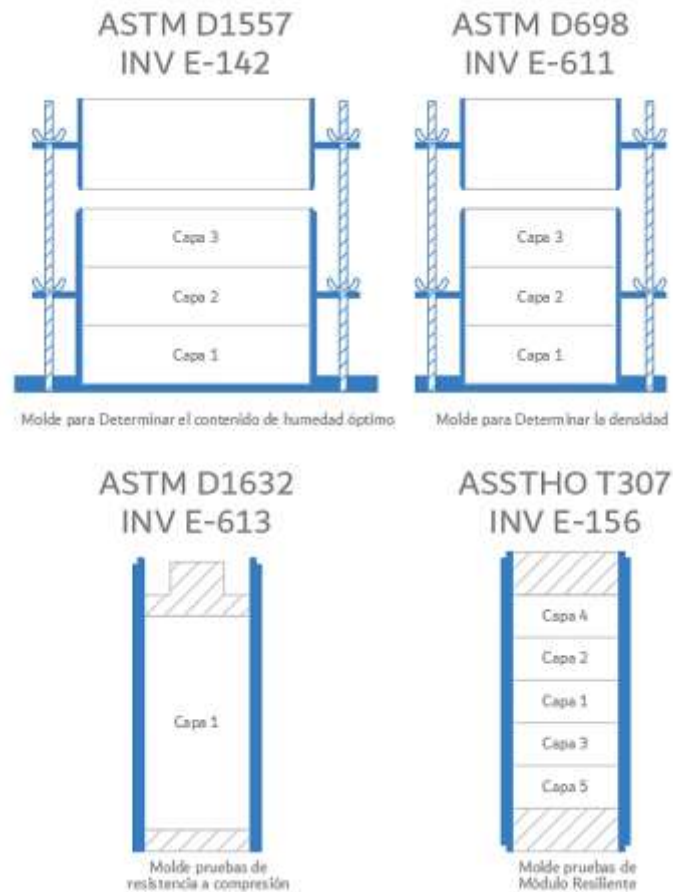
Tabla 4. Método para la elaboración de muestras de suelo-cemento de acuerdo con la regulación vigente, con información tomada de [246], [247], [248], [249], [250].

Método	Volumen del molde	Masa del martillo	Altura de caída	No. de capas	Golpes/capa	Norma
Procedimiento para calcular el contenido de humedad óptimo	2124.0 cm ³	4.54 kg	45.72 cm	5	56	ASTM 1557
Procedimiento para determinar la densidad de suelo cemento	944.0 cm ³	2.49 kg	30.50 cm	3	25	ASTM D698
Preparación de muestras para pruebas de compresión	562.2 cm ³	6.80 kg	7.62 cm	1	Ilimitadas	ASTM D1632
Preparación de muestras para Módulo Resiliente	562.2 cm ³	Carga variable	Compresión	5	1	INV E-156-13 ASSTHO T307

Según la normativa, el primer paso en la elaboración de muestras es calcular la densidad máxima y el contenido óptimo de humedad, ya que estos parámetros son esenciales para evaluar la resistencia y resiliencia del material.

Sin embargo, el uso de distintos moldes de ensayo (ver Figura 26) conlleva variaciones en el porcentaje de compactación, lo que afecta directamente la porosidad, la relación de vacíos y la desviación estándar del diseño. Como consecuencia, se genera una diferencia significativa entre los resultados obtenidos en laboratorio y el desempeño del material en obra.

Figura 26. Moldes usados para realizar el diseño de la mezcla de muestras de suelo cemento, con información tomada de [246], [247], [248], [249], [250].



3 CAPÍTULO II: RESISTENCIA DE LAS MEZCLAS CON DIFERENTES TEMPERATURAS DE CURADO

Resumen

En esta etapa del proyecto, se comparó la resistencia a la compresión de tres residuos arcillosos provenientes de trabajos de excavación, construcción y demolición (RCDs), cada uno con diferentes contenidos de materia orgánica, medidos mediante pérdida por ignición (LOI).

Se realizaron un total de 153 muestras cilíndricas, utilizando una técnica de compactación por compresión monotónica, con diversas dosificaciones de cemento y agua. Los resultados mostraron una variabilidad no significativa en porosidad y relación de vacíos.

Mediante técnicas de estadística multivariada, se correlacionó la resistencia a la compresión con:

- Relación agua/cemento.
- Relación cemento/residuo.

El análisis permitió obtener una función matemática que facilita el cálculo de la dosificación de cemento y el contenido óptimo de agua.

Los resultados indicaron que las superficies de respuesta de los tres tipos de residuos arcillosos presentan concavidades distintas, aumentando la curvatura a medida que se incrementa el contenido de materia orgánica. Esto sugiere que, en suelos con un LOI más alto, el rango para determinar el contenido óptimo de humedad es más reducido.

3.1 DISEÑO METODOLÓGICO

El desarrollo de esta investigación se llevó a cabo en cinco fases experimentales:

Fase 1: Revisión bibliográfica

Se realizó una búsqueda y análisis de información sobre el efecto de la temperatura en el suelo-cemento, utilizando diversas fuentes reconocidas.

Fase 2: Selección y caracterización de muestras

Se seleccionaron muestras aleatorias de sustratos provenientes de dos fuentes de residuos marginales de excavación, construcción y demolición:

- Mina La Colina (T.S. Ingeniería & Cía.): Explotación de agregados pétreos mediante trituración y lavado, generando 300 toneladas diarias de residuos sin valor comercial.
- Mina La Fiscala (Cemex Colombia): Almacena residuos de excavaciones de obras de infraestructura en la Sabana de Bogotá, los cuales, para la fecha del estudio, no eran reutilizados.

Las muestras fueron clasificadas como materiales cohesivos con diferentes índices de plasticidad (CH, CL y SC), y caracterizadas mediante:

- Granulometría (ASTM C136-05).

- Límite líquido y plástico (ASTM D4318-17).
- Relación de vacíos, porosidad y gravedad específica (ASTM D854-14).
- Humedad (ASTM D854-14).
- Conductividad térmica (ASTM D5334-14).
- Caracterización química por:
 - Fluorescencia de rayos X (XRF).
 - Difracción de rayos X (XRD).
 - Microscopía electrónica de barrido (SEM).

Se buscó identificar un patrón de correlación entre las características físicas de plasticidad y la conductividad térmica.

Fase 3: Medición de resistencia mecánica y temperatura

Para evaluar la resistencia mecánica, se elaboraron mezclas de suelo-cemento con las muestras caracterizadas en la fase anterior, utilizando cemento hidráulico estructural en tres dosificaciones.

- Durante las primeras 32 horas, se midió la temperatura de las muestras cada 15 minutos con un Datalogger digital.
- Las muestras fueron curadas en cabinas húmedas a 25°C y una humedad relativa $\geq 96\%$.
- Se buscó correlacionar el contenido de cemento hidráulico con el incremento de temperatura, asociado a la energía liberada por la reacción exotérmica durante el fraguado. Para ello, las mediciones se realizaron en una cabina semiadiabática, diseñada para minimizar la influencia de la temperatura ambiente en las muestras.

Fase 4: Monitoreo de temperatura en diferentes condiciones de curado

Se monitoreó la temperatura de nuevas muestras con las mismas dosificaciones de cemento hidráulico, pero curadas en tres cabinas con temperaturas controladas:

- 10°C.
- 28°C.
- 40°C.

Las muestras se mantuvieron a humedad relativa $\geq 96\%$ durante 32 horas, registrando la temperatura cada 15 minutos.

El objetivo fue identificar la relación entre la temperatura externa y la temperatura interna de las muestras, y determinar la línea de tendencia que vincula la temperatura de curado con la evolución térmica del suelo-cemento.

Fase 5: Evaluación de resistencia y modelado predictivo

Se midió la resistencia a la compresión, tracción indirecta y módulos de resiliencia de todas las muestras de suelo-cemento a los 7 días de edad, aplicando cargas dinámicas según el método AASHTO T307.

Los resultados se correlacionaron con las variables identificadas en las fases previas para desarrollar un modelo de red neuronal artificial.

El propósito del modelo fue:

1. Identificar el efecto de la temperatura en la resiliencia del suelo-cemento.
2. Determinar el escalonamiento óptimo de variables como:
 - Densidad.
 - Relación de vacíos y porosidad.
 - Clasificación mineralógica.
 - Humedad.
 - Conductividad térmica.
 - Temperatura de curado.
 - Desarrollo de resistencia mecánica.

A continuación, se muestra la tabla con el número de ensayos realizados a cada una de las muestras seleccionadas:

Tabla 5. Relación de ensayos de laboratorio para el Diseño Experimental

	Muestras	CH	CL	SC	Total, ensayos
		Mina La Fiscalá Cemex	Mina La Colina TS. Ingeniería	Mina La Colina TS. Ingeniería	
Fase	Caracterización	1	1	1	3
	Índice de Plasticidad (IP)	1	1	1	3
	Gradación	1	1	1	3

	Muestras	CH	CL	SC	Total, ensayos
		Mina La Fiscalá Cemex	Mina La Colina TS. Ingeniería	Mina La Colina TS. Ingeniería	
	Porosidad (n)	3	3	3	9
	Relación de vacíos (e)	3	3	3	9
	Conductividad térmica (l)	3	3	3	9
	Fluorescencia Rayos X (XRF)	1	1	1	3
	Difracción Rayos X (XRD)	1	1	1	3
	Microscopía óptica (MO)	1	1	1	3
	Microscopía (SEM)	1	1	1	3
Fase experimental II	Tratamiento 1				
	Contenido de cemento	3%	6%	9%	
	Monitoreo de temperaturas	3	3	3	9
	Conductividad térmica (l)	3	3	3	9
	Resistencia a la tracción	3	3	3	9
	Resistencia a la compresión	3	3	3	9
Fase experimental III	Tratamiento 2				
	Temperatura de curado	10°C	28°C	40°C	
	Monitoreo de temperaturas	9	9	9	27
	Conductividad térmica (l)	9	9	9	27
	Resiliencia	9	9	9	27
	Resistencia a la compresión	9	9	9	27
	Resistencia a la tracción	9	9	9	27
Número total de ensayos					363

Para analizar la información, se emplearon diferentes métodos en función del número de variables de cada fase experimental, los cuales se describen a continuación:

3.1.1 Experimentos con un solo factor basados en el análisis de varianza (ANOVA)

Este método permite comparar condiciones o tratamientos mediante un análisis de varianza (ANOVA) de un factor, lo que facilita la evaluación de su efecto sobre una variable cuantitativa [251].

Para la fase experimental I, la variable categórica (nominal u ordinal) que define los grupos que deseamos comparar la llamamos independiente o factor, que para este caso es la conductividad térmica. A la variable cuantitativa (de intervalo o razón) en la que deseamos comparar los grupos la llamamos dependiente.

El tratamiento o condición es el tipo de suelo, SC para los residuos areno arcillosos, CL, para los residuos arcillosos del lavado de las arenas y CH para los residuos arcillosos de la mina La Fiscalá.

Para evaluar la efectividad del modelo se debe determinar el resultado del experimento a partir de la formulación de dos hipótesis, la primera conocida como hipótesis nula (H_0) que corresponde a la suposición de que existe una igualdad en las medias de datos observados, a partir de que la probabilidad de cometer el error tipo 1 sea de $\alpha=0.05$ y $\alpha=0.01$.

Para lograrlo es necesario aceptar que ninguna prueba es 100% cierta, puesto que se basa en probabilidades. Cuando se realiza una hipótesis se pueden cometer dos tipos de errores y sus riesgos están inversamente relacionados, según el nivel de significancia y la potencia de la prueba. En la Tabla 6 se muestra que el resultado puede tener dos posibilidades, en dos realidades. La realidad es la hipótesis nula, que consiste en afirmar que las medias de todos los tratamientos o técnicas de mezclado son iguales, esta se puede evaluar a partir de los resultados y decidir si es falsa o verdadera, pero las dos posibilidades es rechazar la hipótesis nula o aceptarla.

Tabla 6. Decisión basada en la muestra, adaptada de [252].

		Realidad $H_0: \mu = \mu_0$	
		H_0 Verdadera	H_0 Falsa
Resultado	Rechazar H_0	Error Tipo I ($\alpha=0.05, \alpha=0.01$)	Decisión correcta (Probabilidad= $1-\beta$)
	No Rechazar H_0	Decisión correcta (Probabilidad= $1-\alpha$)	Error Tipo II (β)

Se rechaza la hipótesis nula, una vez se compruebe que existe una relación entre los parámetros de medición (variable independiente) sobre los resultados (variable dependiente). Para este caso, se rechaza la hipótesis nula si existe una relación entre el número del método de mezclado y la resistencia a la tensión.

Sin embargo, cuando se rechaza la hipótesis nula cuando es verdadera, se comete un error de tipo 1 y su probabilidad se conoce como nivel de significancia (α); pero cuando no se rechaza la hipótesis nula y esta resulta ser falsa, se comete un error tipo II, cuya probabilidad se conoce como (β). Para el experimento propuesto, es necesario evaluar los resultados a partir de dos niveles de significancia, $\alpha_1=0.05$ y $\alpha_2=0.01$.

Los requisitos para evaluar el modelo son:

- El registro de los datos sea completamente aleatorizado.

- Se deben verificar los supuestos de independencia, normalidad y homogeneidad de varianzas
- De acuerdo con la confiabilidad del modelo, se debe revisar que el tamaño de la muestra corresponde con un valor igual al 95%, para validarlo se usará el comando `pwr.p.test`.
- Todos los comandos, datos y modelos serán validados en el programa R Studio.

3.1.2 Modelos de regresión simple

En los modelos de regresión simple o regresión lineal la variable independiente es la variable predictoras o variable respuesta y las variables que dependen de esta, son las variables de regresión o variables explicatorias. Del mismo modo como se realiza en el modelo de un solo factor, se deben validar los supuestos de normalidad, se debe realizar la prueba de hipótesis (ANOVA para variables cuantitativas y MANOVA para variables categóricas). Se debe validar la especificación del modelo, homocedasticidad, no autocorrelación y normalidad de los residuos.

Cada modelo de regresión se analiza gráfica y numéricamente a través de la validación de los supuestos.

Estos modelos de regresión se usan para esta investigación para identificar las siguientes relaciones:

- Conductividad térmica, en función de la humedad, el índice de plasticidad y el contenido de humedad.
- Temperatura liberada, en función del contenido de cemento en la mezcla.
- Incremento de la temperatura en función de la resistencia a la compresión y a la tracción indirecta.

3.1.3 Modelos de regresión multivariados

Esta metodología como las otras dos mencionadas son de uso exploratorio, describe tendencias y principales fuentes de variación en los datos [253]. El modelo regresión multivariada, no requiere vincular los datos con hipótesis previas, son estudios multidimensionales que abordan la variabilidad entre los objetos en sentido multivariado.

Dentro de las técnicas que abordan el análisis multivariado y que podrían utilizarse en esta investigación son:

- Regresión y correlación múltiples
- Análisis multivariado de varianza y covarianza
- Regresión logística
- Análisis de correspondencia

- Mapeo perceptivo o escalamiento multidimensional

Para aplicar este método es necesario, como primera medida determinar cuál es la variable respuesta y cuáles son las variables explicatorias. Seguido, se debe verificar la normalidad de la variable respuesta. Con el Análisis de Varianza ANOVA o MANOVA, se puede revisar inicialmente si los Pr indican o no incidencia en la variable respuesta, si el R^2 es representativo y si existe multicolinealidad.

Así mismo, se debe validar la multicolinealidad, la especificación, la homocedasticidad, la no autocorrelación y la normalidad de los residuos. Si alguno de estos criterios no se cumple, el modelo no es estadísticamente válido, por lo que se deberá realizar transformaciones de potencia [254].

Este método se podrá aplicar en la investigación para validar la relación de los resultados de los ensayos de laboratorio, de la siguiente manera:

- En la caracterización química, en función con el índice de plasticidad.
- En el diseño de mezclas, con la resistencia obtenida.
- La resistencia, en función de la densidad, contenido de cemento, contenido de agua y temperatura de curado.

3.1.4 Red Neuronal Artificial

El cuarto objetivo de la investigación consiste en validar una red neuronal artificial utilizando **R Studio**, con el propósito de integrar en un único modelo todas las variables relevantes identificadas en la fase experimental. Para seleccionar dichas variables, en las primeras etapas de la investigación se aplicaron modelos básicos de estadística multivariada, tales como regresión múltiple, regresión logística y matriz de correlaciones.

Antes de realizar cualquier modelado multivariado, fue necesario validar el diseño experimental mediante la verificación de supuestos estadísticos como la multicolinealidad, la especificación del modelo, la homocedasticidad, la independencia de las observaciones, la normalidad de los residuos y la regresión múltiple [255]. Estos análisis se llevaron a cabo durante las primeras tres fases del proyecto con el fin de garantizar que, en la cuarta fase, la red neuronal artificial pueda modelar de manera precisa las relaciones entre las propiedades de las mezclas, los contenidos de agua, los niveles de esfuerzo y el número de ciclos en las pruebas de resiliencia.

Diversas publicaciones científicas han demostrado que las redes neuronales pueden encontrar automáticamente los pesos de las conexiones sin necesidad de construir modelos manualmente uno por uno, logrando resultados satisfactorios [256], [257], [258]. Para la predicción del Módulo Resiliente (MR), el algoritmo de entrenamiento más utilizado es el método de retropropagación de

Levenberg-Marquardt, debido a su capacidad para minimizar el Error Cuadrático Medio (MSE) [259]. Además, los algoritmos de aprendizaje empleados para ajustar los pesos y sesgos de la red neuronal deben seleccionarse en función del tamaño de la muestra y la variabilidad de los datos [260], [261], [262], [263].

Tomando como referencia estudios previos sobre la predicción del **Módulo Resiliente** bajo la influencia de ciclos de congelación y descongelación, fenómeno directamente relacionado con la temperatura [259], y otras investigaciones sobre mezclas de suelo y cemento, se sugiere la implementación de un modelo ANN de retropropagación (backpropagation) [258]. Este modelo consta de una capa de entrada, una capa oculta y una capa de salida. El número de neuronas de entrada y salida se define en función de las variables relevantes para la predicción del Módulo Resiliente, incluyendo el índice de plasticidad (PI), el peso unitario seco máximo, el contenido de agua gravimétrico (w), el número de ciclos de carga (No.), la tensión de confinamiento (σ_c) y la tensión desviadora (σ_d). La capa de salida consta de una sola neurona, correspondiente al Módulo Resiliente (MR) [256], [261].

De acuerdo con la norma técnica de ensayo, cada muestra deberá someterse a quince secuencias de carga, distribuidas en seis secuencias con una presión de cámara de 41.4 kPa, cinco secuencias con una presión de cámara de 27.6 kPa y cuatro secuencias con una presión de cámara de 13.8 kPa. Cada secuencia debe incluir cien ciclos de carga, siguiendo el protocolo especificado en la norma:

Tabla 7. Secuencia de ensayo para suelos (INV-E-156), adaptada de [249].

Secuencia	Presión de cámara	Esfuerzo axial máximo	Esfuerzo cíclico	Esfuerzo constante	Número de aplicaciones
0	41.4 KPa	27.6 KPa	24.8 KPa	2.8 KPa	1000
1	41.4 KPa	13.8 KPa	12.4 KPa	1.4 KPa	100
2	41.4 KPa	27.6 KPa	24.8 KPa	2.8 KPa	100
3	41.4 KPa	41.4 KPa	37.3 KPa	4.1 KPa	100
4	41.4 KPa	55.2 KPa	49.7 KPa	5.5 KPa	100
5	41.4 KPa	68.9 KPa	62.0 KPa	6.9 KPa	100
6	27.6 KPa	13.8 KPa	12.4 KPa	1.4 KPa	100
7	27.6 KPa	27.6 KPa	24.8 KPa	2.8 KPa	100
8	27.6 KPa	41.4 KPa	37.3 KPa	4.1 KPa	100
9	27.6 KPa	55.2 KPa	49.7 KPa	5.5 KPa	100
10	27.6 KPa	68.9 KPa	62.0 KPa	6.9 KPa	100
11	13.8 KPa	13.8 KPa	12.4 KPa	1.4 KPa	100
12	13.8 KPa	27.6 KPa	24.8 KPa	2.8 KPa	100

Secuencia	Presión de cámara	Esfuerzo axial máximo	Esfuerzo cíclico	Esfuerzo constante	Número de aplicaciones
13	13.8 KPa	41.4 KPa	37.3 KPa	4.1 KPa	100
14	13.8 KPa	55.2 KPa	49.7 KPa	5.5 KPa	100
15	13.8 KPa	68.9 KPa	62.0 KPa	6.9 KPa	100
Número Total de Ciclos por muestra					2,500
Total, de ciclos por 27 pruebas					67,500

La norma del ensayo define el módulo resiliente como la relación entre las amplitudes del esfuerzo axial repetido y la deformación unitaria axial resultante. Esto implica que, al aplicar un esfuerzo axial cíclico de magnitud, duración y frecuencia fijas sobre una muestra preparada y acondicionada, se mide la deformación axial total recuperable. A partir de este valor se calcula el módulo resiliente en relación con el esfuerzo axial desviador.

En un solo ensayo se registran aproximadamente 2.500 ciclos, de los cuales se consideran los últimos cinco ciclos de cada secuencia. Si el experimento incluye 27 muestras, se obtendrán 2.025 datos, lo que permite generar un volumen suficiente de información con un número reducido de ensayos. En este contexto, el modelo de Red Neuronal Multicapa basado en el algoritmo de retropropagación se ajusta mejor a los requerimientos del estudio. Este modelo aprende de manera continua, procesando los datos a través de múltiples capas hasta encontrar la ruta óptima que relacione correctamente la entrada con la salida.

No se descarta la posibilidad de emplear modelos más complejos como el Deep Learning, utilizando frameworks avanzados como H2O, que pueden manejar millones de registros. Sin embargo, este tipo de algoritmos también ofrece buenos resultados con volúmenes de datos más reducidos. H2O emplea la función `h2o.grid()` para realizar la búsqueda de los mejores hiperparámetros, ajustando el modelo según la distribución de los datos. Entre los argumentos principales se incluyen el nombre del algoritmo, los parámetros del modelo, una lista con los valores de los hiperparámetros a comparar, el tipo de búsqueda ("Cartesian" o "RandomDiscrete") y un criterio de parada en el caso de búsqueda aleatoria. Una vez finalizada la búsqueda, el objeto `grid` generado almacena todos los modelos, los cuales pueden ser extraídos para su análisis [264].

El paquete H2O, especializado en redes neuronales profundas, usa por defecto la función de activación Rectifier, que anula los valores negativos y deja inalterados los positivos, funcionando especialmente bien en modelos de redes convolucionales. No obstante, diversas investigaciones han señalado que la función sigmoide suele ofrecer mejores resultados en problemas de predicción como

este. La función sigmoide transforma los valores de entrada en una escala de 0 a 1, donde los valores altos tienden asintóticamente a 1 y los valores bajos tienden a 0.

El paquete H2O de aprendizaje profundo para redes neuronales artificiales, tiene por defecto la función de activación 'rectifier', esta función transforma los valores introducidos anulando los valores negativos y dejando los positivos tal como entran. Esta función se comporta bien con imágenes y tiene un buen desempeño en redes convolucionales.

Actualmente, la función Tanh (Tangente Hiperbólica) ha demostrado un mejor desempeño, ya que su salida está acotada en el rango $(-1,1)$ [260], permitiendo una mejor distribución de los datos dentro de la red neuronal. Por esta razón, se proyecta validar el modelo utilizando Tanh como función de activación. Sin embargo, durante la fase de modelado se evaluarán las tres funciones de activación (Rectifier, Sigmoide y Tanh) para determinar cuál ofrece el mejor rendimiento en este caso específico.

Ecuación 5. Función Tangente hiperbólica

$$\text{Tanh}(x) = \frac{1 - \exp(-2x)}{1 + \exp(-2x)}$$

En cuanto a la optimización del modelo, los resultados dependen en gran medida del ajuste adecuado de los hiperparámetros, los cuales no pueden determinarse con certeza de antemano. Siguiendo las recomendaciones del creador del paquete H2O, la función `h2o.grid()` se ejecutará para buscar los mejores hiperparámetros y generar un conjunto de modelos en el objeto `grid`, que luego serán analizados para seleccionar la mejor configuración.

El descenso de gradiente (Gradient Descent) es el algoritmo de optimización más comúnmente utilizado para minimizar la función de error en redes neuronales, ajustando los pesos del modelo en función del gradiente negativo. Sin embargo, su principal limitación radica en la necesidad de procesar un gran volumen de datos, lo que puede resultar computacionalmente costoso al calcular el error para todas las observaciones.

Como alternativa, se empleará el descenso de gradiente estocástico (Stochastic Gradient Descent - SGD), que actualiza los pesos del modelo en cada iteración utilizando subconjuntos de datos aleatorios, reduciendo el costo computacional sin afectar significativamente la precisión del modelo. Dependiendo del tamaño del conjunto de datos, el algoritmo de optimización más adecuado será L-BFGS para conjuntos de datos pequeños, y Adam o RMSprop para conjuntos de datos más grandes.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Como se describió en el diseño metodológico, los materiales utilizados en esta investigación corresponden a residuos de construcción y demolición clasificados como residuos huérfanos o marginales, debido a su bajo aprovechamiento en obras de infraestructura. Estos suelos cohesivos son comúnmente descartados por su poca utilidad en aplicaciones convencionales de la ingeniería civil.

La muestra 1, denominada SC por su composición de arena arcillosa, está conformada por un 24% de material que pasa el tamiz 200 y 76% de arenas finas, según su granulometría. Este material es un subproducto del lavado de gravas para concreto, extraídas de un depósito aluvial cuaternario (Q-ca), compuesto por abanicos aluviales y depósitos coluviales. Su color natural, de acuerdo con la carta de colores Munsell, es 7.5YR 7/6 (ver Figura 27).

Figura 27. Sección del mapa geológico de Colombia, ubicación Mina T.S. Ingeniería, adaptada de <https://srvags.sgc.gov.co>.



La muestra 2, identificada como CL, corresponde a una arcilla de media a baja plasticidad. A pesar de que, según la Clasificación Unificada de Suelos (USCS), esta muestra supera el 50% en límite líquido, lo que la clasifica como arcilla de alta compresibilidad, para efectos de esta investigación se ha etiquetado como CL para diferenciarla de la tercera muestra. Este material es un residuo arcilloso resultante del lavado de arenas para la producción de concreto, el cual es decantado y secado a temperatura ambiente. Su origen geológico es el mismo que el de la muestra SC, pero a diferencia de esta, el material de la muestra CL pasa el 100% del tamiz 200. Su color natural, según la carta de colores Munsell, es 10YR 7/6.

Figura 28. Depósito de residuos arcillosos del lavado de arenas para la producción de concreto, Mina T.S. Ingeniería.



El tercer residuo, clasificado como CH, corresponde a una arcilla de alta compresibilidad. El 100% de su masa pasa el tamiz No. 200, y su procedencia es distinta a las muestras anteriores. Este material proviene de excavaciones profundas en diversos sectores de la sabana de Bogotá, siendo recolectado y depositado en la antigua mina de explotación de agregados pétreos La Fiscala, ubicada en Tunjuelo, Bogotá D.C., y actualmente administrada por Cemex Colombia. Geológicamente, este material forma parte de un depósito de arcillas, turbas y arcillas arenosas con niveles delgados de gravas, y presenta la particularidad de contener capas de diatomeas de la edad Pleistoceno. Su color natural, según la carta de colores Munsell, es 10YR 3/1.

Figura 29. Sección del mapa geológico de Colombia, ubicación sabana de Bogotá D.C., adaptada de <https://srvags.sgc.gov.co>.



3.2.1 Características físicas

La clasificación física de las tres muestras analizadas se presenta en la Tabla 8, donde se evidencian diferencias significativas en el índice de plasticidad (IP) y la gravedad específica (Gs). Se trata de tres minerales arcillosos con propiedades distintas, cuya relación entre el índice de plasticidad y la gravedad específica muestra una tendencia proporcional.

La muestra SC, compuesta principalmente por arena arcillosa, presenta un índice de plasticidad bajo y una gravedad específica mayor, lo que sugiere una menor cohesión y capacidad de retención de humedad en comparación con las otras muestras.

Por otro lado, la muestra CL, con una mayor fracción de partículas finas, incrementa su índice de plasticidad y reduce su gravedad específica en relación con la muestra SC, indicando una mayor cantidad de minerales arcillosos activos y una estructura más compacta.

Finalmente, la muestra CH, caracterizada como arcilla de alta compresibilidad, posee el índice de plasticidad más alto y la menor gravedad específica, lo que confirma su mayor capacidad de retención de agua y su tendencia a experimentar cambios volumétricos significativos bajo variaciones de humedad.

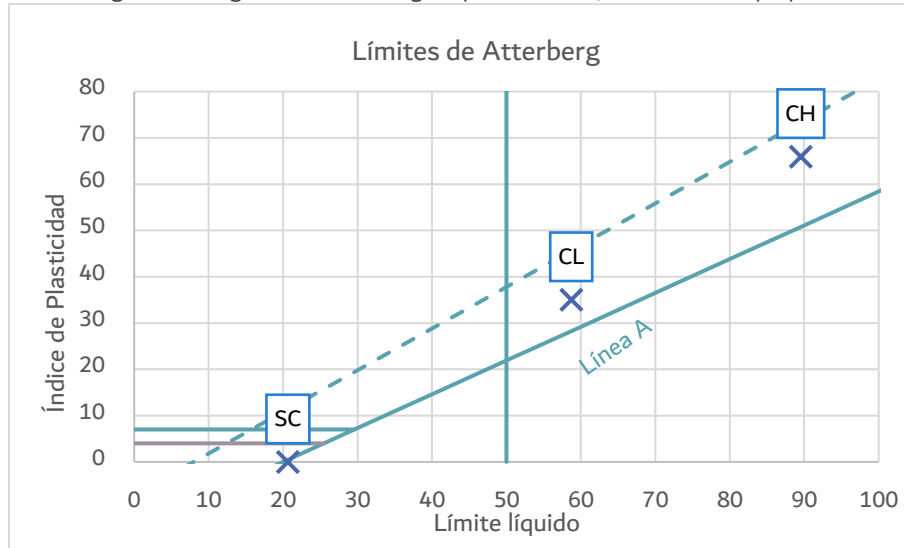
Estos resultados permiten establecer una correlación directa entre la plasticidad del material y su densidad mineralógica, lo que influye en el comportamiento mecánico y térmico de las mezclas de suelo cemento evaluadas en esta investigación.

Tabla 8. Caracterización física de las muestras.

Muestra	Nombre	Índice de plasticidad	Límite líquido	Límite plástico	Relación de vacíos [e]	Humedad natural [w%]	Gravedad específica [Gs]
M1	SC	0	21	25	0.292	3.2%	2.33
M2	CL	35	59	24	0.034	4.2%	2.28
M3	CH	66	90	24	0.304	14.9%	1.76

Si los resultados de los límites de consistencia, plasticidad y límite líquido se grafican en el diagrama de Atterberg, se muestra una proporcionalidad entre tres las muestras arcillosas (ver Figura 30).

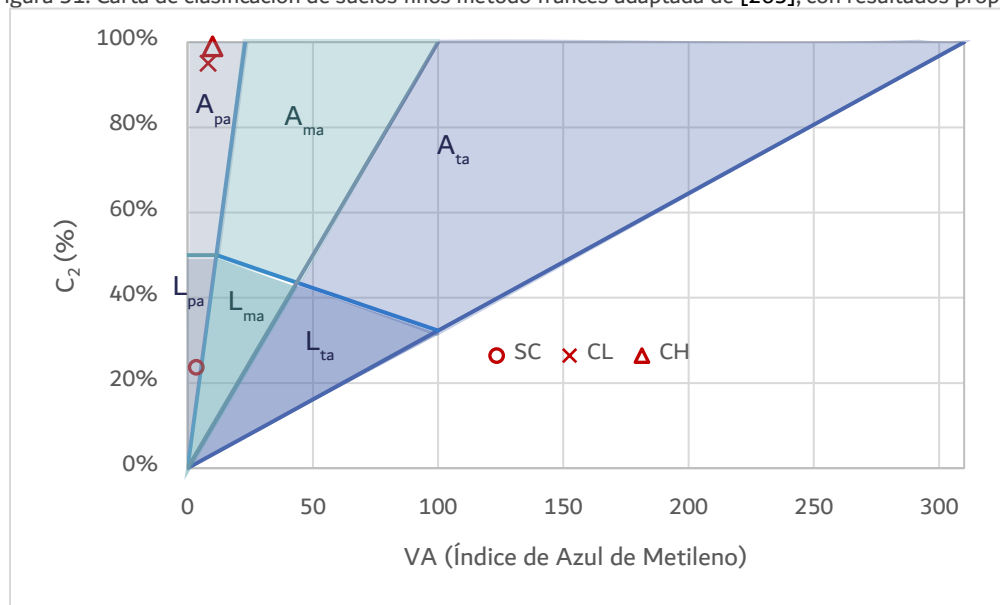
Figura 30. Diagrama de Atterberg adaptada de [50], con resultados propios.



El ensayo de azul de metileno se emplea para evaluar la capacidad de intercambio catiónico y la superficie específica de los minerales arcillosos presentes en un suelo. Dado que los minerales arcillosos poseen cargas eléctricas negativas en su superficie, presentan una alta capacidad de adsorción de cationes, lo que permite medir su actividad coloidal [265]. Según los resultados obtenidos, la muestra 1 (SC) registró un valor de adsorción (V_a) de 3.4 meq/100g ss, la muestra 2 (CL) un valor de 8.2 meq/100g ss, y la muestra 3 (CH) alcanzó los 10.0 meq/100g ss.

De acuerdo con el método francés de Magnan y Youssefain, las muestras 2 y 3 (CL y CH) se ubican en la franja de arcillas poco activas (A_{pa}), mientras que la muestra 1 (SC) se encuentra en el rango de limos poco activos (L_{pa}), como se evidencia en la Figura 31.

Figura 31. Carta de clasificación de suelos finos método francés adaptada de [265], con resultados propios.



Los resultados del ensayo de azul de metileno indican que las muestras 2 y 3 (CL y CH) corresponden a arcillas poco activas, mientras que la muestra 1 (SC) se clasifica dentro del rango de limos poco activos. Esta clasificación es consistente con el concepto de actividad de las arcillas propuesto por Skempton (1953), quien definió la actividad como la relación entre el índice de plasticidad y el porcentaje en peso de partículas menores a 2 micras. Según esta relación, las muestras CL y CH contienen filosilicatos con características de caolinita, mientras que la muestra SC presenta una composición predominantemente cuarzosa.

Los materiales con baja actividad se caracterizan por tener bordes con cargas netas negativas que solo pueden atraer cationes en bajas proporciones. Esto implica una menor capacidad de retención de agua y menor tendencia al hinchamiento. La actividad de las arcillas también está relacionada con su potencial relativo de contenido de agua, lo que influye en su comportamiento mecánico y su interacción con otros materiales en mezclas de suelo cemento. Estos aspectos se resumen en la Tabla 9, donde se establece la clasificación de suelos arcillosos en función de su actividad y su potencial de cambio volumétrico.

Tabla 9. Clasificación de los suelos arcillosos por su actividad, según Skempton, [266].

Clasificación	Actividad	Mineral predominante
Baja	0.0	Cuarzo
	0.18	Calcita
	0.23	Mica (Muscovita)
	0.33 – 0.46	Caolinita
Mediana	0.90	Illita
Alta	1.5	Ca-Montmorillonita
	7.2	Na-Montmorillonita

La actividad de las arcillas se relaciona con el potencial de hinchamiento y el cambio volumétrico del material. Sin embargo, su comportamiento estructural depende de la interacción de fuerzas atractivas y repulsivas entre los elementos de su red cristalina. Dentro de estas interacciones, destacan cuatro tipos principales:

- ❖ Fuerza atractiva de Van der Waals, son fuerzas muy pequeñas (10^{-2} a 10^{-19} erg. Cm) de rango corto ($<5\text{\AA}$). En la caolinita debido a que las capas 1:1 enfrentan planos de oxígeno contra planos de hidroxilo, la unión entre las capas se produce parcialmente por este tipo de fuerzas y enlaces de hidrógeno.
- ❖ Fuerza atractiva de sustitución, estas se producen entre los cationes y la superficie de los cristales de arcilla cargados negativamente por sustitución isomórfica cuando las caras

planas se acercan unas a otras. La carga positiva del catión une las capas cargadas negativamente como un cemento electrostático o cemento iónico.

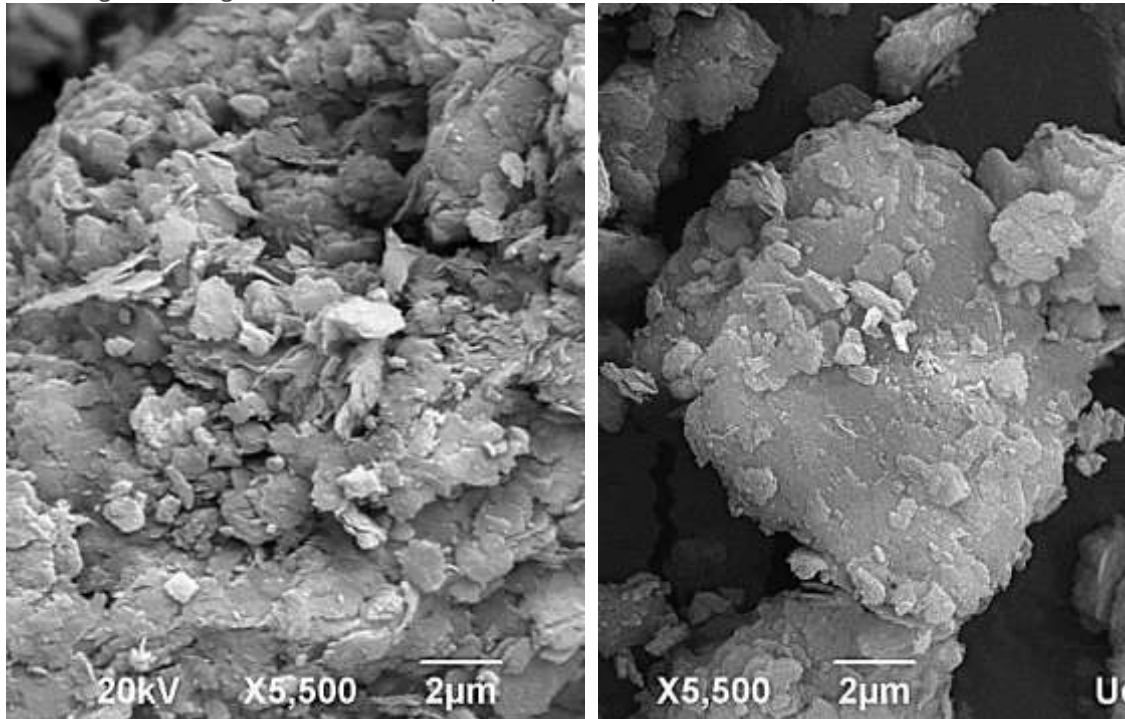
- ❖ Fuerza por enlaces de H^+ , esta fuerza proviene de los enlaces de hidrógeno que se desarrollan entre un plano de oxígenos y un plano de OH^- , en las caolinitas la red hexagonal de oxígeno coincide con la red de hidroxilos determinando la formación de los enlaces o puentes de hidrógeno.
- ❖ Fuerzas por atracciones electrostáticas, estas ocurren como consecuencia de los reemplazos isomórficos cuando la superficie plana adquiere carga negativa permanente y los cantos o bordes de fractura adquieren cargas positivas o cargas variables.

Además, la carga electrostática de estos minerales varía con el pH. En medios ácidos, el H^+ tiende a unirse a los átomos de oxígeno de los bordes de los minerales, mientras que en condiciones alcalinas se separa, modificando la interacción entre las capas minerales y su capacidad de adsorción.

3.2.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

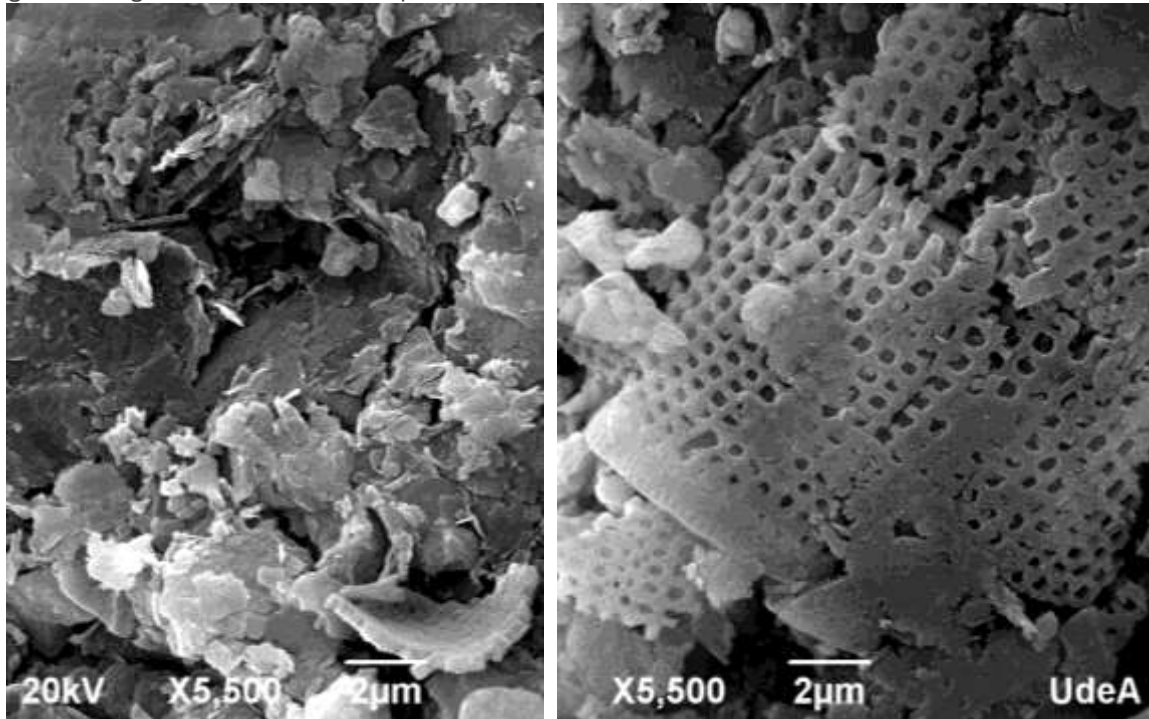
La Tabla 9 confirma que la caolinita es un mineral de silicato en capas 1:1 con baja actividad y escaso potencial de hinchamiento. Su fórmula química, $Al_2Si_2O_5(OH)_4$, la hace menos reactiva al agua, lo que provoca su dispersión en lugar de su expansión. Para corroborar estas características, se analizaron las muestras bajo microscopía electrónica de barrido (SEM), donde se evidenció la estructura laminada propia de las arcillas caoliníticas en la muestra CL. En la Figura 32 la imagen de la izquierda muestra laminaciones hexagonales características de la caolinita, mientras que la imagen de la derecha presenta un agregado de láminas unidas en forma de terrón de arcilla.

Figura 32. Imágenes tomadas de Microscopio Eléctrico de Barrido (SEM) JSM-6490 Muestra 02 CL.



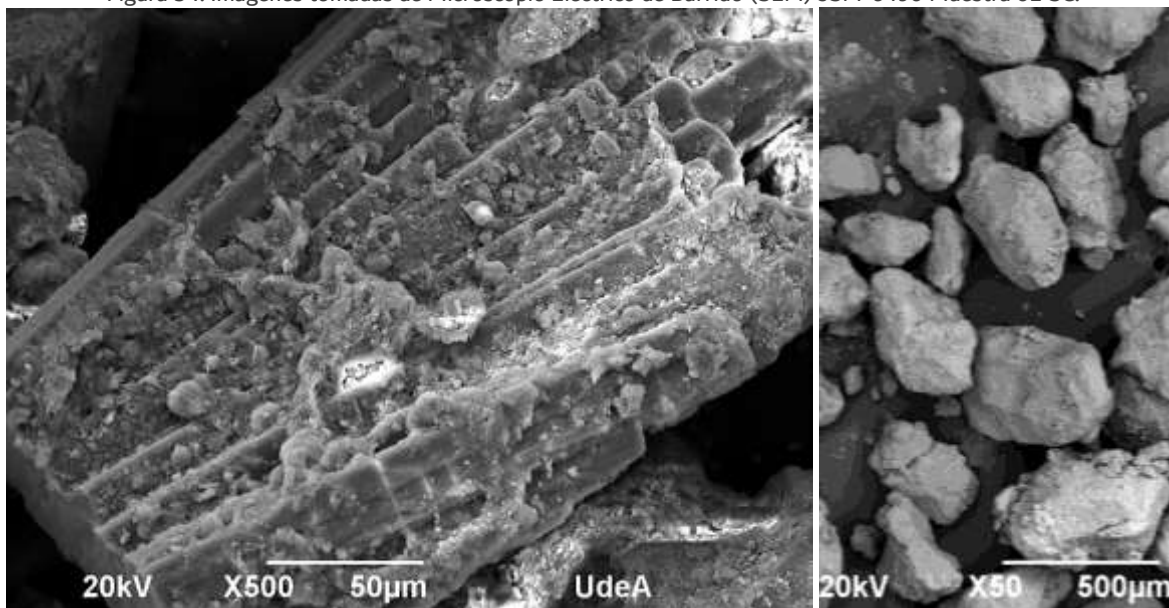
Una estructura similar se observa en la muestra 3 (CH), donde las láminas delgadas se agrupan entre sí. Sin embargo, a diferencia de la muestra 2 (CL), se identifica un mayor contenido de material orgánico. En la Figura 33, la imagen de la izquierda muestra las láminas tipo hojaldras acompañadas de material orgánico, mientras que la imagen de la derecha muestra fragmentos de algas diatomeas, específicamente de **Aulacoseira Ambigua** [267]. Este hallazgo es consistente con la descripción del Instituto INGEOMINAS, que indica que la formación geológica de la sabana de Bogotá es rica en diatomeas, como se evidencia en la muestra 3.

Figura 33. Imágenes tomadas de Microscopio Eléctrico de Barrido (SEM) JSM-6490 Muestra 03 CH.



Por otro lado, las imágenes SEM de la muestra 1 (SC) presentadas en la Figura 34 muestran un cristal de estructura hexagonal tipo tetraédrico, similar al cuarzo, fracturado en varias partes. Estos cristales se encontraron recubiertos con material arcilloso adherido, pero sin presencia significativa de material orgánico. El análisis de la distribución granulométrica indica que la muestra SC tiene una distribución poli granular continua, con partículas de 500 micras en su mayoría y algunas de 2 micras en menor proporción.

Figura 34. Imágenes tomadas de Microscopio Eléctrico de Barrido (SEM) JSM-6490 Muestra 01 SC.



3.2.3 Fluorescencia de Rayos X (XRF) y pérdidas por Ignición

Usando el método de análisis químico por Fluorescencia de Rayos X y pérdidas por ignición se realizó el análisis de composición química con un equipo Axios PANalytical, en perla fundida a las tres muestras registrando los siguientes resultados:

Tabla 10. Análisis químico por Fluorescencia de Rayos X, %Óxidos.

IP	SC	CL	CH	Incertidumbre
SiO ₂	80.1	65.1	62	+/- 0.70
Al ₂ O ₃	8.9	16.6	16.7	+/- 0.30
Fe ₂ O ₃	4.4	7.92	3.7	+/- 0.05
TiO ₂	0.6	0.65	0.76	+/- 0.05
CaO	0.18	0.09	0.7	+/- 0.04
MgO	0.33	0.45	0.6	+/- 0.04
Na ₂ O	0.1	<L.D.	0.3	+/- 0.10
K ₂ O	0.69	1.19	1	+/- 0.08
P ₂ O ₅	0.76	1.17	0.1	+/- 0.04
SO ₃	N.D.	N.D	0.4	+/- 0.00
BaO	-	0.05	0	N.A.
MnO	0.02	0.03	0	N.A.
PPI de 110°C a 1000°C	4	6.8	13.7	+/- 0.50

3.2.4 Difracción de rayos X (XRD)

Usando el método de análisis de difracción de rayos X con una identificación y cuantificación de las posibles fases cristalinas presentes, usando un equipo DRX Aeris, PANalytical, en polvo no orientado, para las tres muestras registrando los siguientes resultados:

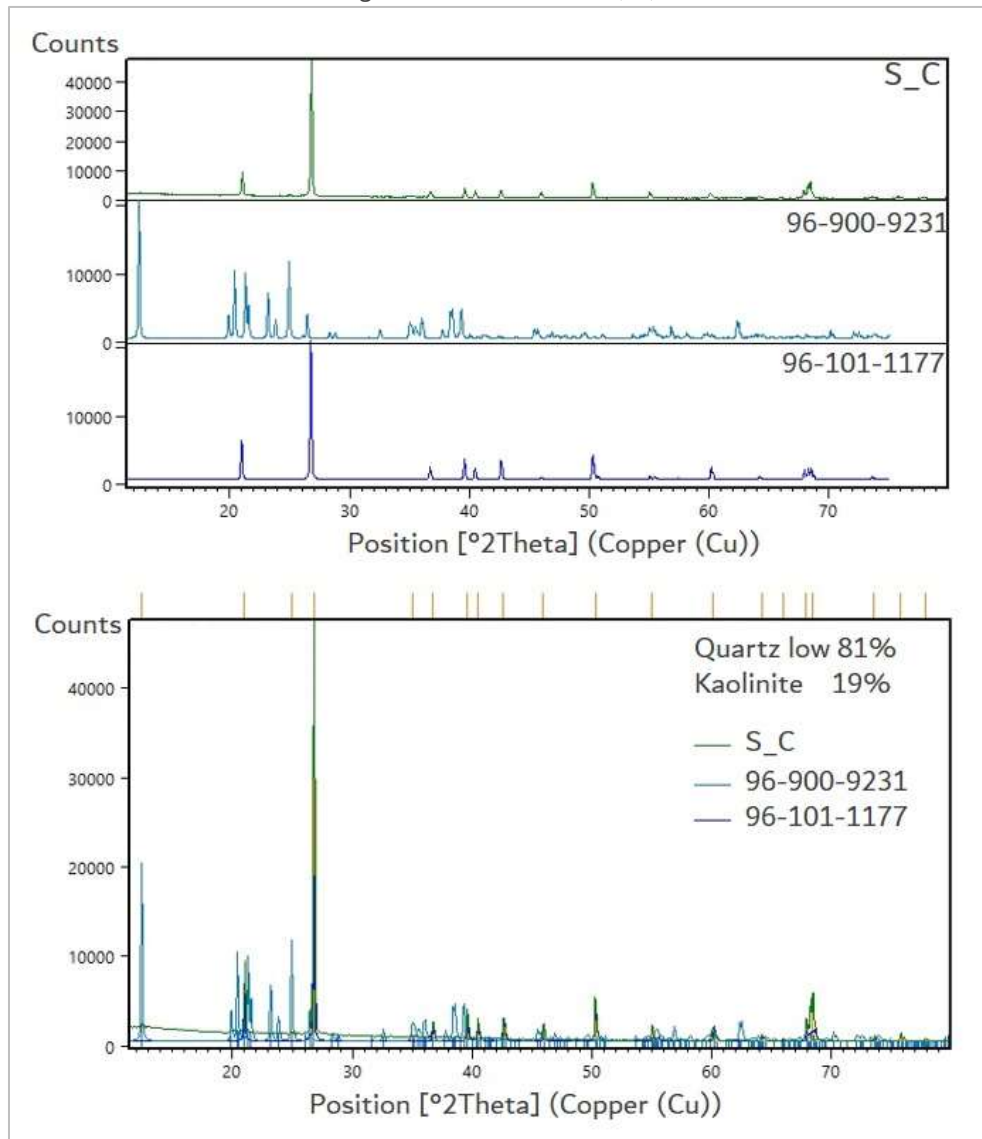
Tabla 11. Semi cuantificación por Difracción de Rayos X, %Óxidos.

	SC	CL	CH
Cuarzo	66-68%	42-44%	39-41%
Caolinita	13-15%	28-30%	27-29%
Illita/Mica	6-8%	13-15%	10-12%
Plagioclasa Na	<1%	N.I.	1-2%
Plagioclasa Ca	<1%	<1%	1-2%
Gibbsita	<1%	N.I.	N.I.
Antigorita	N.I.	<1%	N.I.
Yeso	N.I.	N.I.	<1%
Cordierite	<1%	N.I.	N.I.
Oxi-Hidróxido Fe, Ti	3-5%	4-6%	3-5%
Otros (Sm/Ch/ Amorfos)	5-7%	3-5%	7-10%

Siguiendo los parámetros obtenidos en los ensayos previos, se modeló la composición química de las muestras mediante el software **High Score Plus**. Este programa permitió identificar los patrones que mejor se ajustaban a las curvas de las muestras inalteradas, determinando que los principales minerales presentes eran Cuarzo y Caolinita.

En este proceso, el software seleccionó automáticamente las gráficas más representativas dentro de los grupos de escaneos analizados, destacando tanto los valores predominantes como aquellos atípicos. En la Figura 35 , se muestra la comparación correspondiente a la arena arcillosa (SC), cuya composición química está conformada en un 78% por Cuarzo (96-900-9231) y en un 22% por Caolinita (96-101-1177). Para efectos del análisis, no se consideraron otros minerales, ya que su Score resultó demasiado bajo (inferior a 2) en comparación con los dos principales cristales identificados.

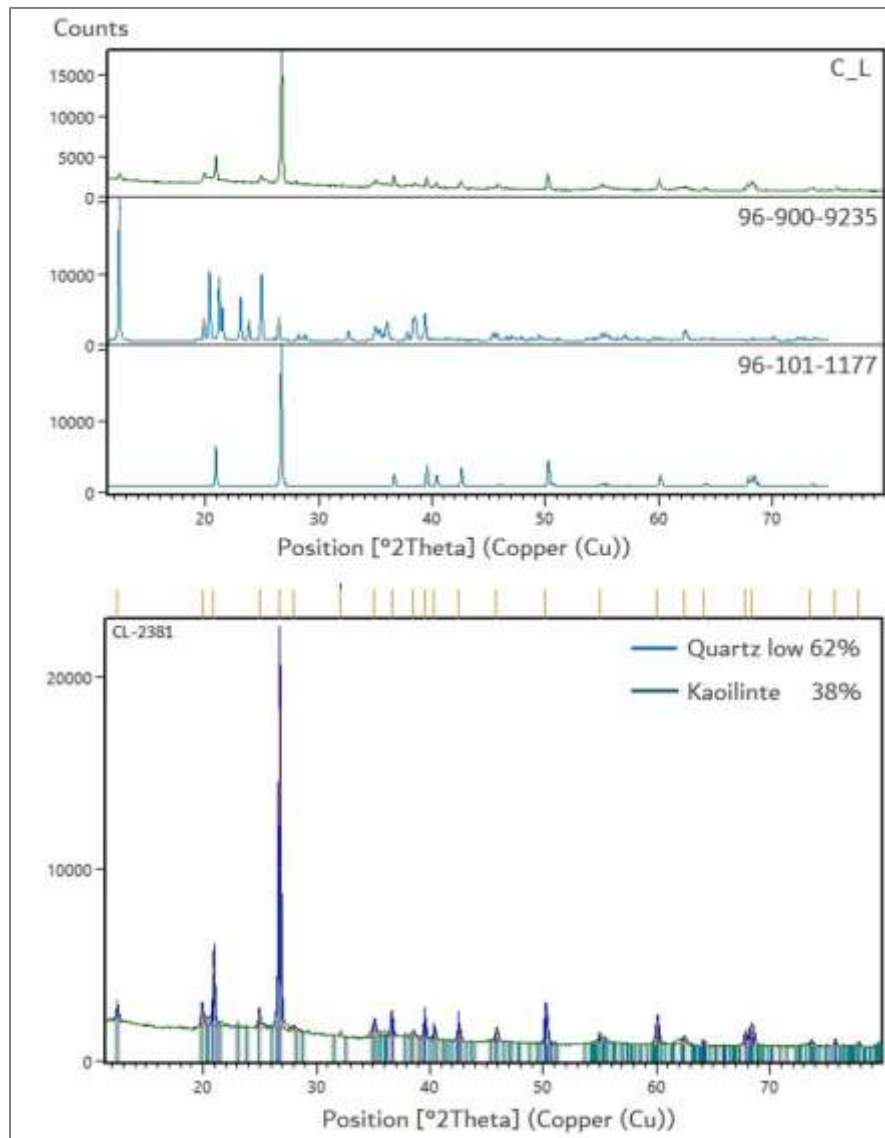
Figura 35. DRX Muestra 01 (SC).



La caracterización mineralógica de la muestra de suelo arcilloso de media plasticidad (CL) confirma que su composición está dominada por Cuarzo (62%) y Caolinita (38%), según los códigos de referencia 96-900-9231 y 96-101-1177, respectivamente. En la Figura 36, se observa el patrón de difracción de rayos X obtenido, donde los picos más intensos corresponden a estas fases cristalinas predominantes.

La presencia de caolinita indica que este suelo tiene una estructura estable con baja actividad química, lo que limita su capacidad de expansión. Por otro lado, el cuarzo, al ser un mineral inerte, contribuye a la estabilidad mecánica del material, favoreciendo su uso en mezclas de suelo-cemento con menores riesgos de contracción o expansión descontrolada.

Figura 36. DRX Muestra 02 (CL).

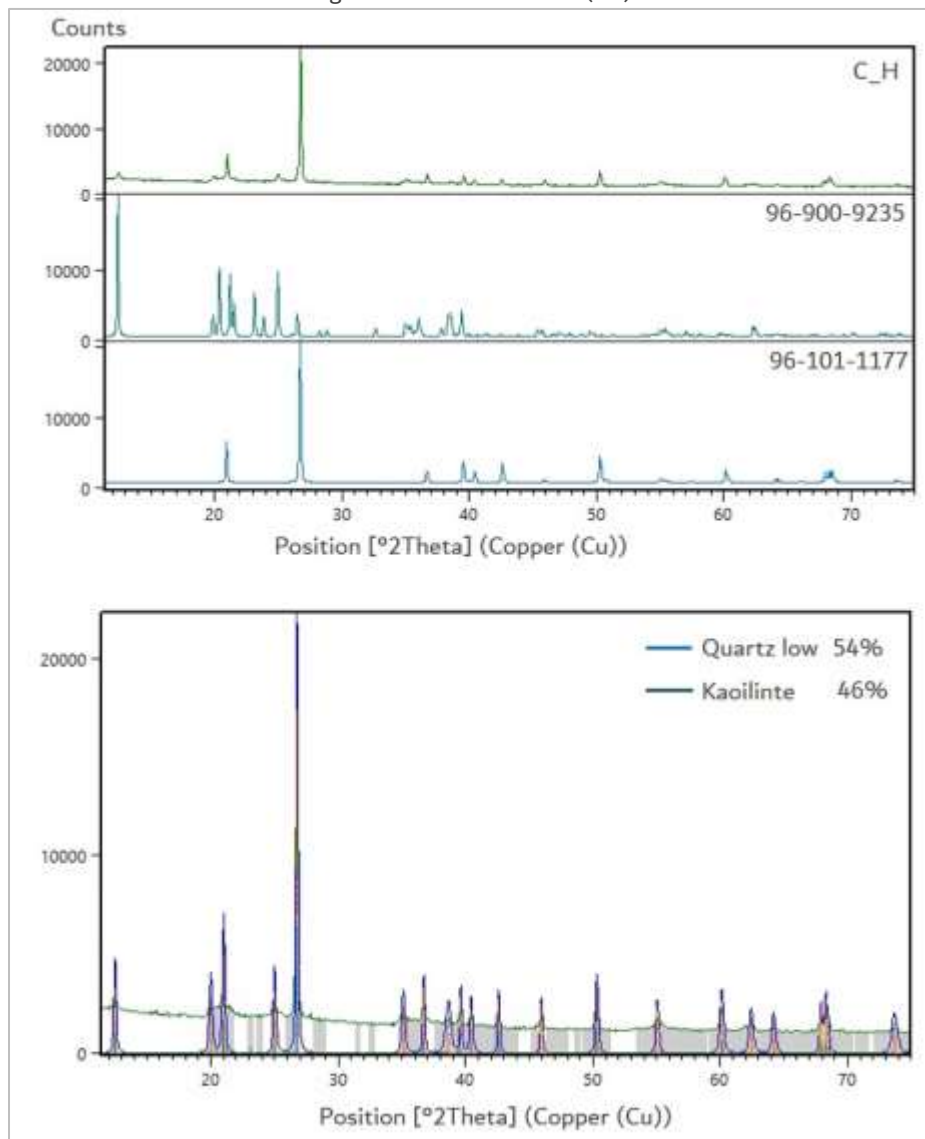


1.

La muestra de arcilla de alta compresibilidad (CH) presenta una composición de 54% de cuarzo (96-900-9231) y 46% de caolinita (96-101-1177), como se observa en la Figura 37. La mayor proporción de caolinita en comparación con la muestra CL sugiere una mayor cohesión y capacidad de retención de humedad, lo que influye directamente en su comportamiento mecánico y térmico.

La combinación de caolinita y cuarzo en estas proporciones indica que el suelo posee una estructura más reactiva en presencia de agua, con mayor plasticidad y potencial de contracción. Esta característica es crucial en aplicaciones de estabilización con cemento, ya que puede influir en la dosificación de agua y en la evolución de resistencias a lo largo del tiempo.

Figura 37. DRX Muestra 03 (CH).



En resumen, las tres muestras presentan una relación proporcional entre el contenido de cuarzo y caolinita, el índice de plasticidad y el índice de actividad, lo que permite establecer una correlación entre su composición mineralógica y sus propiedades mecánicas. Como se muestra en la Tabla 12, la muestra SC contiene la mayor proporción de cuarzo, lo que le confiere menor plasticidad y una actividad coloidal reducida. En contraste, las muestras CL y CH, con un mayor contenido de caolinita, exhiben un mayor índice de plasticidad y actividad, lo que sugiere una mayor capacidad de retención de agua y una respuesta más significativa a la estabilización con cemento.

Estos resultados permiten prever el comportamiento de cada muestra en función de su estabilidad volumétrica y su respuesta ante tratamientos químicos, facilitando la optimización en la dosificación de cemento y agua para su aplicación en proyectos de infraestructura.

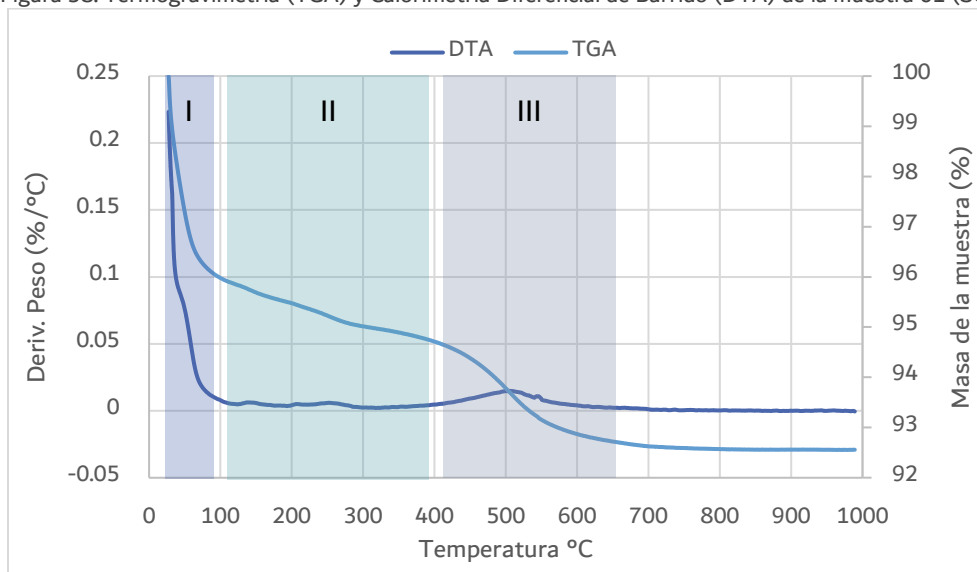
Tabla 12. Difracción de Rayos X, cualitativo.

	SC	CL	CH
Cuarzo (Si_6O_6)	81%	62%	54%
Caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_9$)	19%	38%	46%
IP (Índice de Plasticidad)	0.0	35%	66%
A (Índice de Actividad)	0.0	0.4	0.7

3.2.5 Análisis Termogravimétrico (TGA) y Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

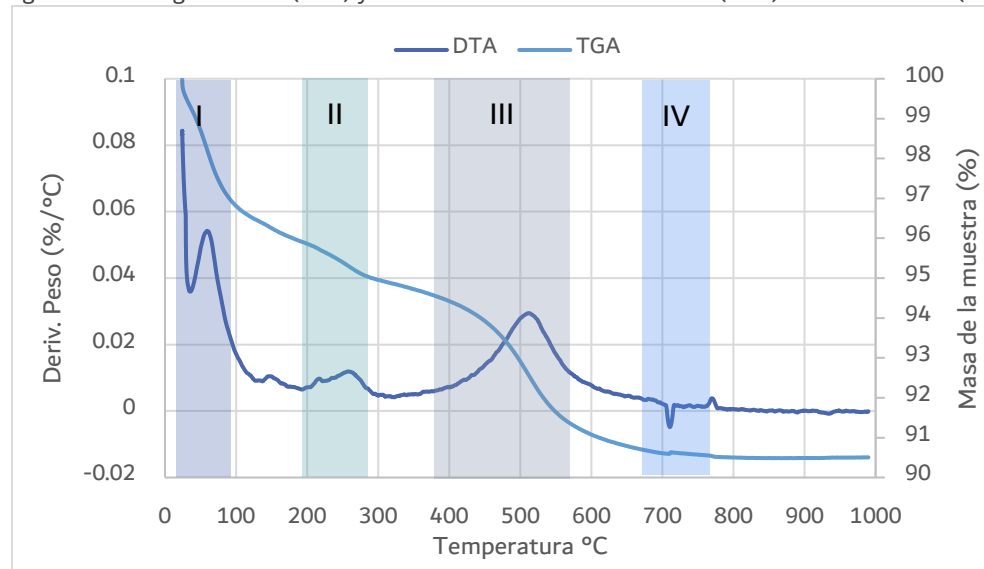
El análisis termogravimétrico es un ensayo que proporciona los datos necesarios para medir la masa de una muestra a lo largo del tiempo, mientras la temperatura cambia a una velocidad controlada. Esta prueba es empleada para analizar características y composición de los materiales, las tasas de descomposición y evaporación, la oxidación, la pureza del material, entre otras.

Figura 38. Termogravimetría (TGA) y Calorimetría Diferencial de Barrido (DTA) de la muestra 01 (SC).



La muestra **SC** (arena arcillosa) presentó una estabilidad térmica destacada a partir de los 600°C, característica propia de su alto contenido de cuarzo. Su mayor pérdida de masa se observó entre los 37°C y 100°C, atribuida a la evaporación de humedad adsorbida, seguida de una segunda pérdida entre 100°C y 400°C, correspondiente a la eliminación de materia orgánica y desorción de moléculas de agua. La deshidroxilación de la caolinita ocurrió en la franja de 400°C a 600°C, sin más cambios térmicos significativos después de esta temperatura, lo que indica una alta estabilidad térmica en ese rango, característica muy común de los cuarzos (Figura 38).

Figura 39. Termogravimetría (TGA) y Calorimetría Diferencial de Barrido (DTA) de la muestra 02 (CL).

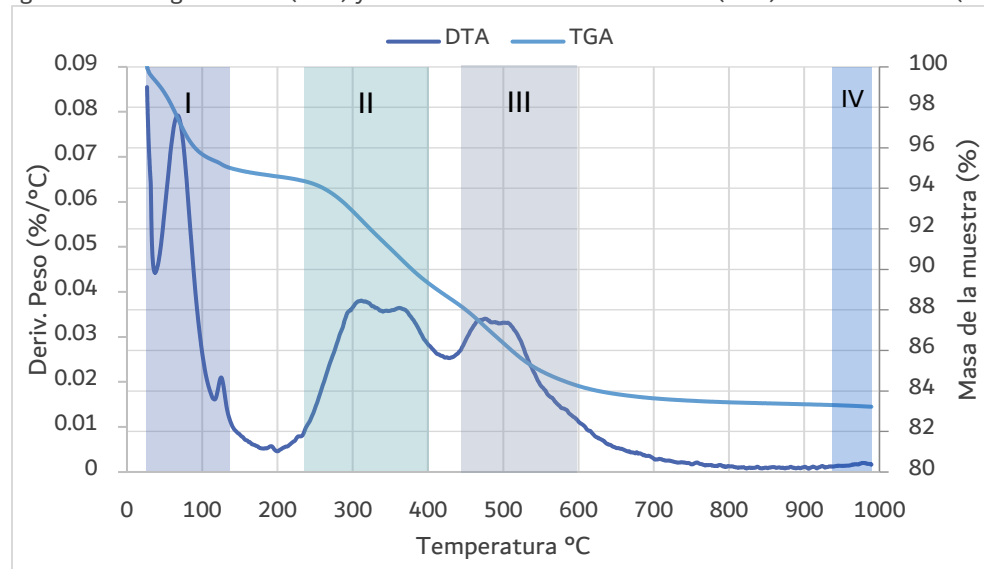


Por otro lado, la muestra **CL** (arcilla caolinita) mostró un comportamiento térmico diferente. Su primera gran pérdida de masa ocurrió entre 24 y 100°C por la eliminación de humedad natural. En la zona II entre los 200 y 300°C, se evidenció la transformación de goethita en hematita o la combustión de material orgánico [268] o en su defecto la pérdida de materia orgánica.

La mayor transformación térmica tuvo lugar entre 450°C y 550°C, donde la caolinita se deshidroxiló y dio paso a la formación de metacaolín, lo que se reflejó en la pérdida de un 4% de su masa total. Esta transformación se debe a que el caolín se calentó más allá de su endotermia, rompiendo los enlaces entre los hidroxilos estructurales y la alúmina. Una vez que se eliminan los hidroxilos estructurales de la caolinita, el aluminio migra a estos sitios vacantes para formar metacaolín [269].

Adicionalmente, a partir de los 700°C se evidenciaron cambios estructurales asociados a la formación de espinelas de aluminio, alcanzando su máxima estabilidad térmica por encima de los 800°C [270].

Figura 40. Termogravimetría (TGA) y Calorimetría Diferencial de Barrido (DTA) de la muestra 03 (CH).



Finalmente, la muestra **CH** (arcilla caolinita de alta plasticidad con diatomeas) presentó un perfil térmico más complejo debido a la presencia de materia orgánica y carbonatos. La primera pérdida de masa, entre 27°C y 110°C, correspondió a la eliminación de agua adsorbida. Posteriormente, entre 280°C y 600°C, se observaron dos picos endotérmicos asociados a la combustión de ácidos húmicos y fúlvicos en la superficie de las diatomeas [271] seguidos de la eliminación de agua estructural coordinada con cationes metálicos. La deshidroxilación de la caolinita se registró a los 500°C, lo que marcó la transición hacia la formación de metacaolín. Finalmente, un pico exotérmico cercano a los 1000°C indicó la transformación del metacaolín en mullita, una fase cristalina altamente estable [272].

Estos resultados confirman las diferencias en la estabilidad térmica y la composición química de los materiales analizados, destacando la mayor estabilidad del cuarzo en la muestra SC, la transformación progresiva de la caolinita en metacaolín en la muestra CL y la influencia de la materia orgánica y carbonatos en la muestra CH. A continuación, se muestran las pérdidas totales por la ignición hasta 1000°C de cada una de las muestras:

Tabla 13. Pérdidas de masa por TGA

Muestra	%Masa final	% Pérdidas de masa hasta 1000°C
SC	92.55	7.45
CL	90.48	9.52
CH	83.22	16.78

3.2.6 Conductividad térmica de los materiales

El análisis de la conductividad térmica de los materiales se llevó a cabo luego de la caracterización geotécnica de tres tipos de sustratos provenientes de depósitos de residuos marginales de excavación en la mina La Fiscala en Bogotá y T.S. Ingeniería en Nilo, Cundinamarca. Se compararon sus propiedades mediante regresión múltiple y un enfoque factorial, con el objetivo de identificar la relación entre la conductividad térmica como variable respuesta y factores como el índice de plasticidad, la relación de vacíos, la porosidad y la composición química y física. Para esto, se emplearon resultados obtenidos de pruebas de fluorescencia de rayos X (XRF), difracción de rayos X (XRD), microscopía óptica (MO) y microscopía electrónica de barrido (SEM).

La medición de la conductividad térmica se realizó siguiendo la metodología de la norma ASTM D5334, utilizando el procedimiento de sonda térmica con aguja. Este método es adecuado para suelos secos, insaturados o saturados con temperaturas entre 0 y 100°C. La medición se llevó a cabo mediante una sonda equipada con un calefactor y un sensor de temperatura, la cual se insertó en las muestras de suelo. Durante el ensayo, se aplicó una corriente eléctrica por un tiempo determinado, lo que generó un incremento en la temperatura de la sonda. Este aumento térmico fue registrado para calcular la conductividad del material analizado [273].

Figura 41. Pruebas de conductividad térmica mediante procedimiento de sonda térmica con aguja.



Para esta investigación se utilizó un medidor 27001P007-TLS100, con el cual se realizaron mediciones de conductividad y resistividad térmica en los tres tipos de residuos arcillosos. Se evaluaron diferentes niveles de humedad y grados de compactación, logrando obtener un total de 88

puntos de medición. Estos datos permitieron correlacionar la conductividad térmica con las características físicas y químicas de cada muestra, proporcionando información clave sobre su comportamiento térmico y su aplicabilidad en mezclas de suelo cemento.

3.2.7 Revisión estadística multivariada

De las 88 pruebas de conductividad térmica se realizó el análisis de estadística descriptiva registrando los siguientes resultados:

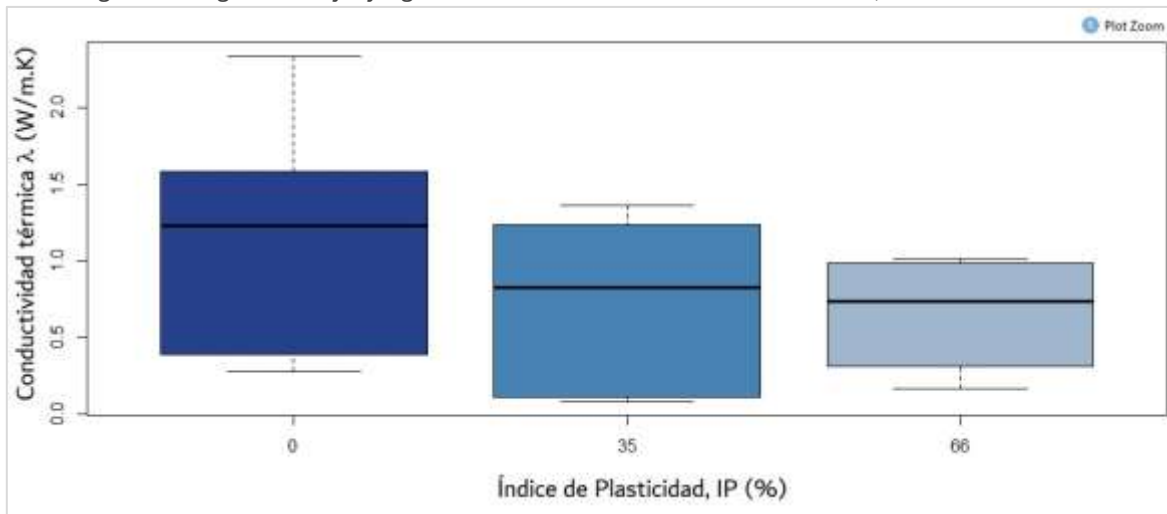
	SC	CL	CH
Media	1.120	0.766	0.662
Mediana	1.225	0.825	0.739
Varianza	0.444	0.251	0.118
Curtosis	-1.196	-1.599	-1.678
Coefficiente de asimetría	0.152	-0.373	-0.322
Mínimo	0.277	0.087	0.167
Máximo	2.329	1.358	1.014
Nivel de confianza	0.349	0.148	0.130
Desviación estándar	0.690	0.507	0.350
Cuenta (n)	28	32	28

El análisis estadístico de las lecturas de conductividad térmica en las muestras CL y CH muestra una ligera asimetría sesgada a la izquierda y una menor varianza en comparación con las lecturas tomadas en la muestra SC. Además, la media y la mediana de la arena SC son más altas que las de las arcillas CL y CH.

En el diagrama de cajas (Figura 42), se observa que la arena SC, con un índice de plasticidad (IP) de 0, presenta valores de conductividad térmica superiores a los registrados en las arcillas con IP de 35 y 66. Asimismo, se evidencia una menor dispersión en los datos obtenidos de la muestra con IP de 66, lo que sugiere una mayor estabilidad en los valores medidos para este tipo de material.

Estos resultados indican que la plasticidad del suelo influye directamente en su capacidad de conducción térmica, donde los suelos con mayor contenido de arcilla y un IP más alto tienden a tener una menor conductividad térmica debido a su estructura más compacta y su mayor capacidad de retención de agua.

Figura 42. Diagrama de cajas y bigotes de los resultados de conductividad térmica, elaborado en R Studio.



3.2.8 Validación estadística de regresión de segundo orden

Para analizar la relación entre la conductividad térmica, el índice de plasticidad, la porosidad y la humedad en las muestras compactadas, se aplicaron dos enfoques estadísticos en R Studio: el modelo lineal (lm) y el modelo de segundo orden (rms).

El análisis de varianza mostró que el estadístico de prueba F (Distribución de Fisher-Snedecor = 76.1) es significativamente mayor que el valor de probabilidad crítica ($Pr = 2.2 \times 10^{-16}$). Esto indica que la región crítica se encuentra en una sola cola superior, lo que lleva a rechazar la hipótesis nula (H_0).

Por lo tanto, se concluye que existen diferencias significativas en la conductividad térmica entre los tres tipos de residuos analizados. Además, se confirma que las variables índice de plasticidad (IP), humedad (W) y porosidad tienen un impacto significativo en los valores de conductividad térmica, lo que refuerza la importancia de estas propiedades en la transmisión de calor en suelos compactados.

```
lm(formula = C ~ IP + w + n, data = datos)
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.82562 -0.12610 -0.07836  0.24226  0.49644

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.861334   0.132477  14.050  < 2e-16 ***
IP           -0.008802   0.001543  -5.704  1.70e-07 ***
w             1.662287   0.125572  13.238  < 2e-16 ***
n            -2.570592   0.305210  -8.422  8.62e-13 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.2737 on 84 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.731,    Adjusted R-squared:  0.7214
F-statistic: 76.1 on 3 and 84 DF, p-value: < 2.2e-16
```

No obstante, aun habiendo diferencias significativas cuando el modelo de un solo factor se corre, el R^2 es de 0.7214. Al correr el código rsm, este valor aumenta a 0.7803.

```
rsm(formula = C ~ FO(W, n, W * IP), data = datos)
              Estimate Std. Error      t value      Pr(>|t|)
(Intercept)   1.880549    0.117553    15.9975 < 2.2e-16 ***
W              3.086468    0.230647    13.3818 < 2.2e-16 ***
n             -3.298455    0.253146    -13.0298 < 2.2e-16 ***
c("W", "IP") -0.030873  0.003866  -7.9857 6.48e-12 ***
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
Multiple R-squared:  0.7879, Adjusted R-squared:  0.7803
F-statistic: 104 on 3 and 84 DF, p-value: < 2.2e-16
```

Para determinar si el modelo se ajusta y es adecuado, se procede a verificar los supuestos:

Tabla 14. Validación de supuestos para el modelo de correlación entre la conductividad Térmica y el tipo de suelo.

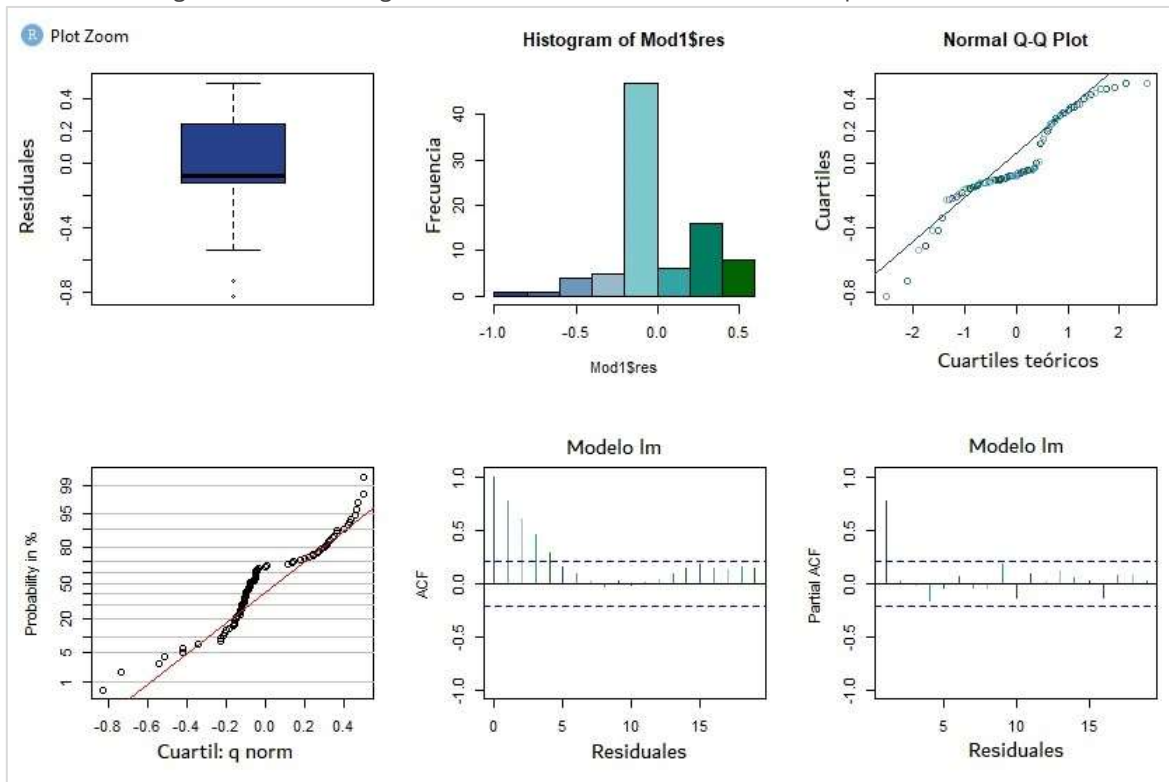
Prueba de validación		Hipótesis Nula H0	
Independencia	Durbin-Watson	DW=0.42 Pv=2.2e-16	Existe correlación entre los resultados
Normalidad	Shapiro-wilk	W=0.923 Pv=6.87e-05	No hay normalidad
	Kolmogorov-Smirnov	D=0.197 PV=0.02045	No hay normalidad
Homocedasticidad	Goldfeld-Quandt	GQ=0.39 Pv=0.998	Si hay homocedasticidad
Homogeneidad	Breusch-Godfrey	LM=53.9 Pv=2.09e-13	No hay homogeneidad

A pesar de que el análisis inicial indica un efecto del tipo de suelo sobre la conductividad térmica, la revisión de los supuestos estadísticos muestra que el modelo no es válido. Se observa una alta dispersión en los datos y falta de homogeneidad, lo que sugiere la presencia de correlaciones entre las variables que no pueden ser explicadas adecuadamente por el modelo lineal aplicado.

Dado que los datos presentan una variabilidad significativa y no cumplen con los supuestos de normalidad y homocedasticidad, es necesario realizar transformaciones o ajustes adicionales al modelo. Esto podría incluir el uso de modelos no lineales, transformaciones de variables o enfoques más avanzados como la regresión multivariada o técnicas de aprendizaje automático para mejorar la capacidad predictiva del modelo y obtener una relación más precisa entre la conductividad térmica y las características del suelo.

En la Figura 43 y la Tabla 14 se evidencian estos problemas, reforzando la necesidad de explorar métodos alternativos para una mejor representación estadística de los datos.

Figura 43. Verificación gráfica de la normalidad del modelo colisionado para los residuales.



Dado que la conductividad térmica no solo depende del tipo de suelo, sino también de variables como la humedad, la densidad y la porosidad de la muestra, se procede a realizar una regresión múltiple que incluya todas estas variables. El objetivo es comprender mejor el comportamiento de la conductividad térmica en un entorno multidimensional, identificando interacciones y efectos combinados que podrían no ser evidentes en un análisis univariado.

La regresión múltiple permitirá evaluar la influencia relativa de cada factor sobre la conductividad térmica y detectar posibles correlaciones entre las variables independientes. Esto es crucial para mejorar la precisión del modelo y proporcionar una base más sólida para la interpretación de los resultados. Además, este enfoque facilitará la identificación de ajustes necesarios en el modelo, como transformaciones de datos o técnicas de regularización, en caso de que se presenten problemas de multicolinealidad o heterocedasticidad.

Figura 44. Diagrama de multicolinealidad entre las variables que influyen en la Conductividad térmica.



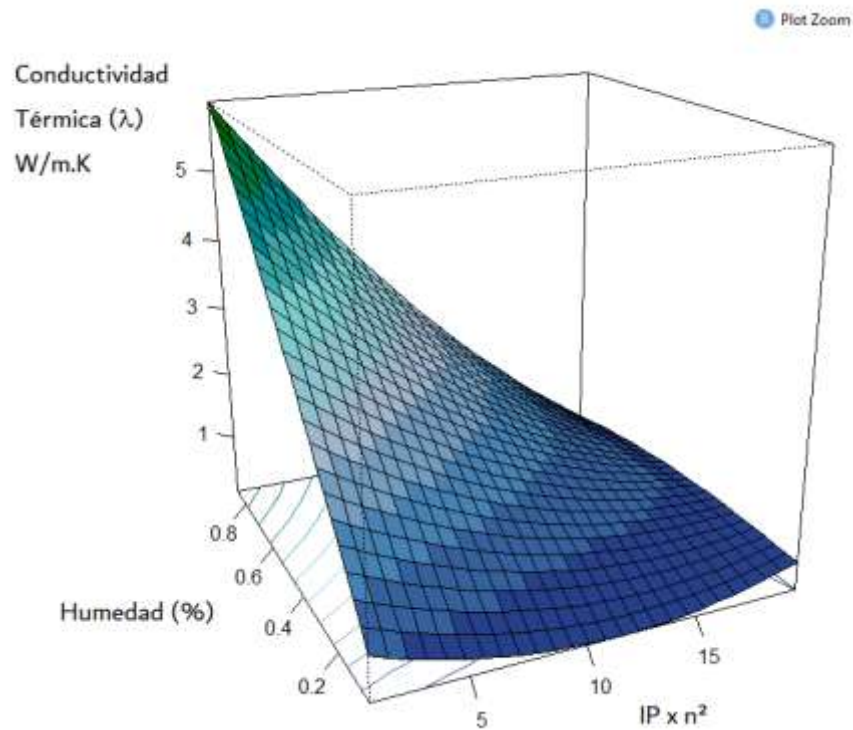
Donde, C es conductividad Térmica, LL es el Límite líquido, IP es el índice de plasticidad, W es la humedad, e es la relación de vacíos y n es la porosidad.

El modelo de regresión obtenido mediante el análisis ANOVA multifactorial permitió establecer la relación entre el índice de plasticidad, la porosidad de las muestras y la conductividad térmica. A partir de este modelo se generó una superficie de respuesta que describe cómo varía la conductividad térmica en función de estas variables.

El análisis de correlación (Figura 44) previo evidenció que la mayoría de los coeficientes de correlación son inferiores a 0.5, lo que indica que no existen problemas significativos de multicolinealidad. Sin embargo, algunos valores superiores a 0.5 sugieren una relación estrecha entre ciertas variables, como el índice de plasticidad y el límite líquido, así como entre la porosidad y la relación de vacíos. Por esta razón, se decidió eliminar el límite líquido y la relación de vacíos, dejando únicamente el índice de plasticidad y la porosidad como variables influyentes en el modelo.

El modelo obtenido proporciona una ecuación matemática que describe la conducta de la conductividad térmica en términos de estas variables. Esto permite predecir su comportamiento bajo diferentes condiciones y facilita la identificación de rangos óptimos para mejorar la estabilidad térmica de los suelos estabilizados con cemento.

Figura 45. Superficie de respuesta de la Conductividad térmica en función del índice de plasticidad (IP), la porosidad (n) y la humedad (W%).



Los resultados de la validación de supuestos del modelo se muestran en la Tabla 15, donde se logra correlacionar asertivamente la conductividad en función de la humedad, la porosidad y el índice de plasticidad de cada tipo de suelo, a través de la metodología de superficie de respuesta (RSM).

Tabla 15. Validación de los supuestos del modelo RSM.

Supuesto	Coefficiente	P-value	Hipótesis
Normalidad	0.184	0.05166	Tiene distribución normal
Especificación	2.9715	0.05691	Bien especificado
Homocedasticidad	0.062495	1	Los residuos son homocedásticos
No Autocorrelación	1.538	0.06554	No autocorrelación
Homogeneidad	3.3138	0.0687	Los residuos no son homogéneos

Modelo de superficie de respuesta:

```
rsm(formula = C ~ SO(W, IP_n), data = datos2)
```

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	0.5052723	0.0773547	6.5319	5.103e-09	***
W	7.5784654	0.5794061	13.0797	< 2.2e-16	***
IP_n	-0.1134368	0.0147051	-7.7141	2.566e-11	***
W:IP_n	-0.3500102	0.0585583	-5.9771	5.651e-08	***
W^2	-0.9544231	0.5451836	-1.7506	0.08375	.
IP_n^2	0.0056149	0.0012208	4.5992	1.525e-05	***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Multiple R-squared: 0.8708, Adjusted R-squared: 0.8629
F-statistic: 110.5 on 5 and 82 DF, p-value: < 2.2e-16

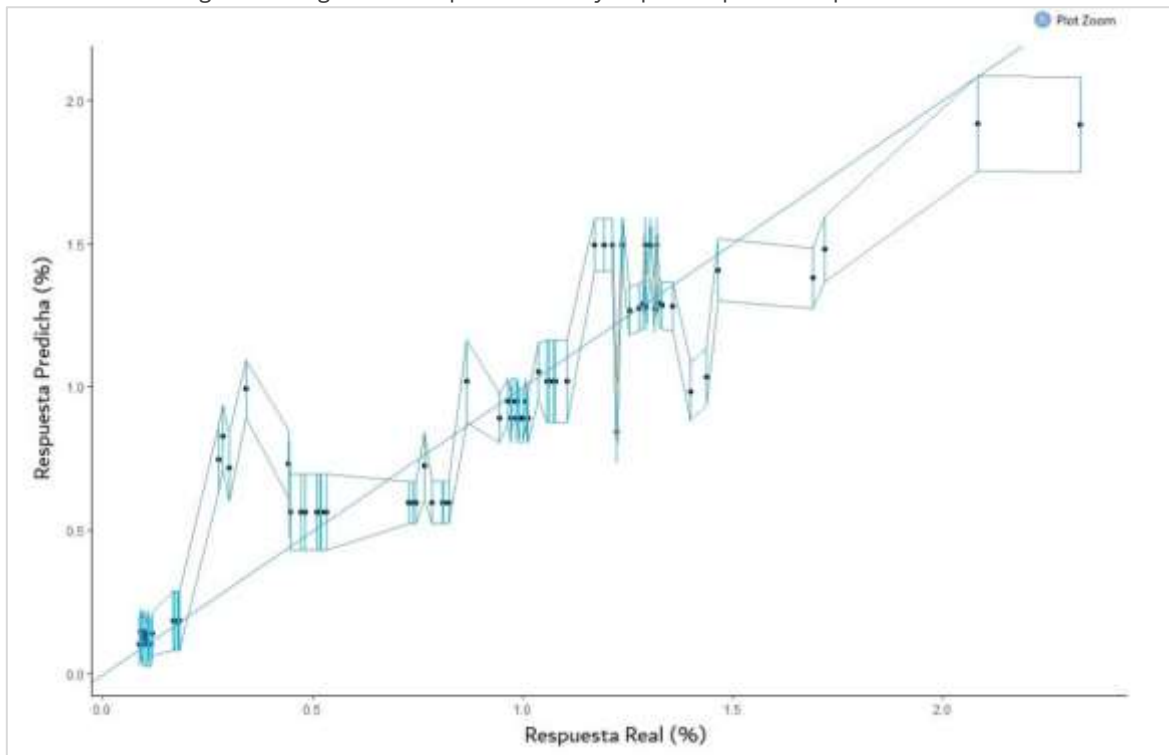
El modelo obtenido, expresado en la Ecuación 6, demuestra con un nivel de confianza del 86% que la porosidad y el índice de plasticidad afectan negativamente la conductividad térmica, mientras que la humedad tiene un efecto positivo. Este comportamiento sugiere que, a mayor porosidad o plasticidad, la capacidad de conducción térmica del material disminuye, mientras que un mayor contenido de humedad facilita la transferencia de calor.

La validación del modelo mediante la comparación de valores reales y predichos (Figura 46) muestra una baja dispersión de los residuos y un ajuste adecuado de los datos, con una confiabilidad del 80%. Esto indica que el modelo es sólido y puede ser utilizado para predecir la conductividad térmica de los residuos de excavación, construcción y demolición en función de sus propiedades físicas.

Ecuación 6. Modelo de Conductividad térmica en función de la humedad, porosidad e índice de plasticidad

$$\left(\frac{W}{mK}\right) \lambda = 0.5052723 + 7.5784654W - 0.1134368 IP \cdot n^2 - 0.3500102 W \cdot IP \cdot n^2 - 0.9544231W^2 + 0.0056149(IP \cdot n^2)^2$$

Figura 46. Diagrama de Respuestas reales y respuestas previstas a partir del modelo.

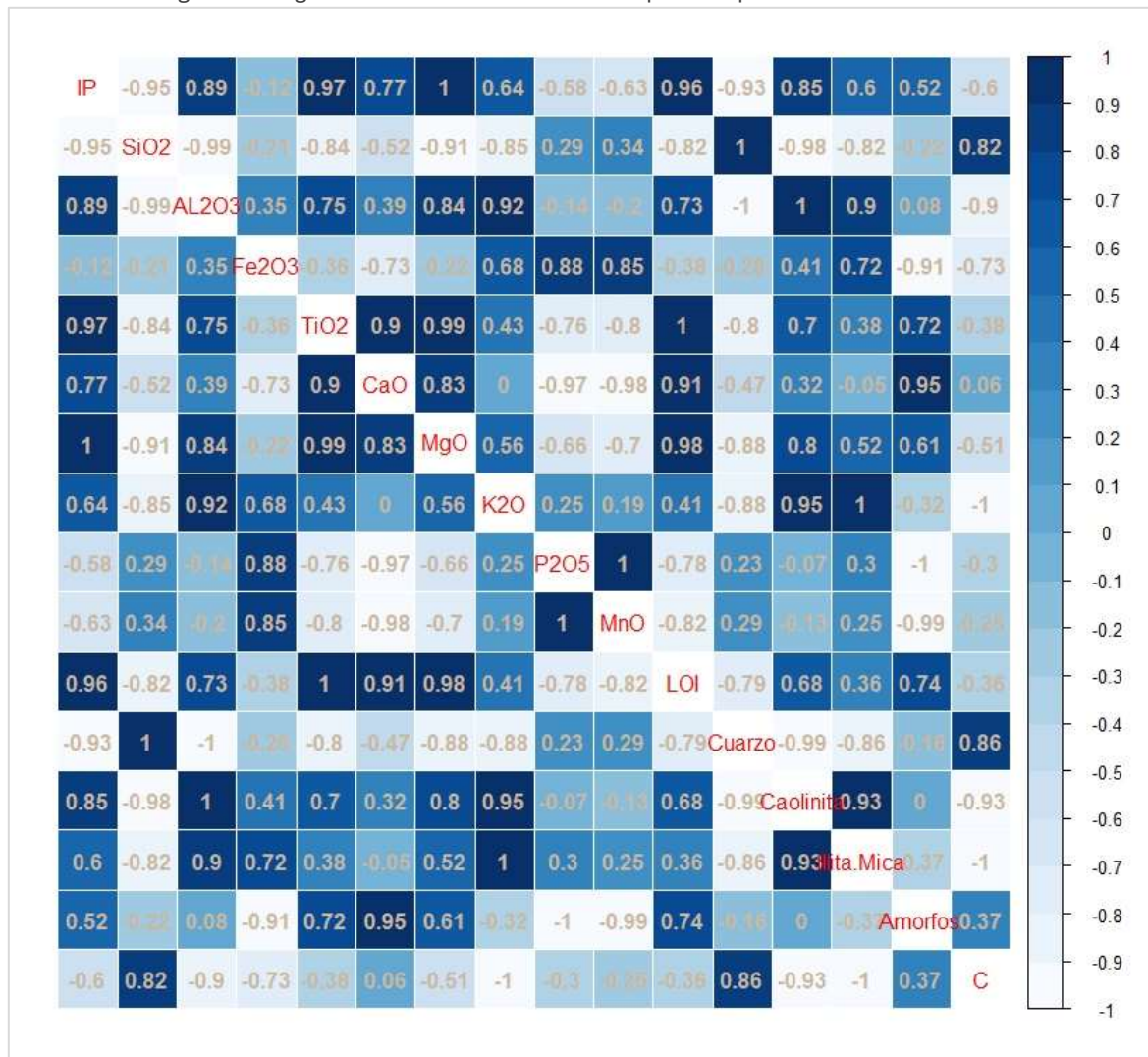


3.2.9 Relación de la conductividad térmica con la composición química

El análisis de multicolinealidad (Figura 47) evidencia relaciones clave entre las variables estudiadas. Se observa que el índice de plasticidad (IP) tiene una fuerte correlación positiva (>0.9) con el

contenido de dióxido de titanio (TiO_2) y con las pérdidas por ignición (LOI), lo que sugiere que los materiales más plásticos presentan una mayor cantidad de compuestos volátiles y elementos asociados a la materia orgánica.

Figura 47. Diagrama de multicolinealidad de la composición química de las tres muestras.

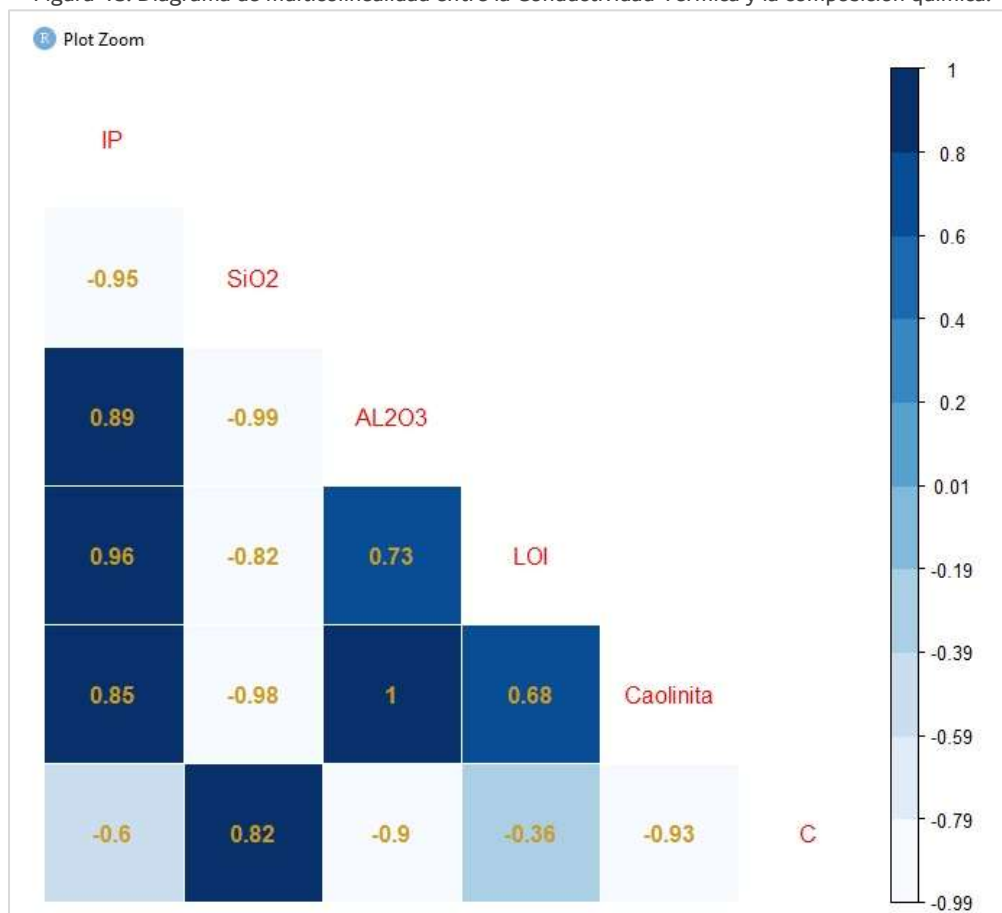


Por otro lado, el IP está inversamente correlacionado con el contenido de sílice (SiO_2) y cuarzo, lo que indica que los materiales con mayor plasticidad contienen menos cuarzo y más minerales arcillosos. De hecho, se encontró que el contenido de cuarzo es inversamente proporcional al de caolinita (-0.99), lo que confirma que a medida que aumenta la cantidad de caolinita en la muestra, disminuye la presencia de cuarzo.

Además, las pérdidas por ignición (LOI) presentan una correlación positiva con el contenido de óxidos de magnesio (MgO), calcio (CaO) y dióxido de titanio (TiO_2), lo que sugiere que estos elementos están asociados a la materia orgánica y a los minerales arcillosos.

En cuanto a la conductividad térmica, se identificó que es directamente proporcional al contenido de sílice (SiO_2) y cuarzo, lo que significa que los suelos con mayor proporción de estos minerales tienden a tener una mayor capacidad de conducción de calor. Por el contrario, la conductividad térmica es inversamente proporcional al contenido de óxido de aluminio (Al_2O_3), potasio (K_2O), caolinita e illita, lo que indica que los materiales arcillosos, especialmente aquellos con alta plasticidad, presentan una menor capacidad para conducir calor.

Figura 48. Diagrama de multicolinealidad entre la Conductividad Térmica y la composición química.



Tras el análisis de los resultados, se identificaron los elementos en la composición química con mayor influencia en la conductividad térmica. Entre ellos, el índice de plasticidad (IP) juega un papel clave, ya que está directamente relacionado con la capacidad del material para retener agua y su estructura mineralógica. Además, el contenido de sílice (SiO_2) es un factor determinante, dado que los materiales con alto porcentaje de cuarzo presentan mayor conductividad térmica.

Por otro lado, el contenido de óxido de aluminio (Al_2O_3) y caolinita tiene una relación inversa con la conductividad térmica, lo que indica que los materiales más arcillosos presentan menor capacidad de conducción de calor. Asimismo, las pérdidas por ignición (LOI), que reflejan la presencia de materia

orgánica y compuestos volátiles, también influyen en la conductividad térmica, ya que los materiales con mayor contenido de LOI suelen presentar menor conductividad.

Además, se identificó una estrecha relación entre el índice de plasticidad (IP) y el contenido de materia orgánica, representado por las pérdidas por ignición (LOI) en el rango de temperatura de 110 a 1000°C. Esta relación se puede modelar mediante una línea de tendencia polinomial, lo que indica que a mayor índice de plasticidad, mayor será el contenido de materia orgánica en las muestras analizadas.

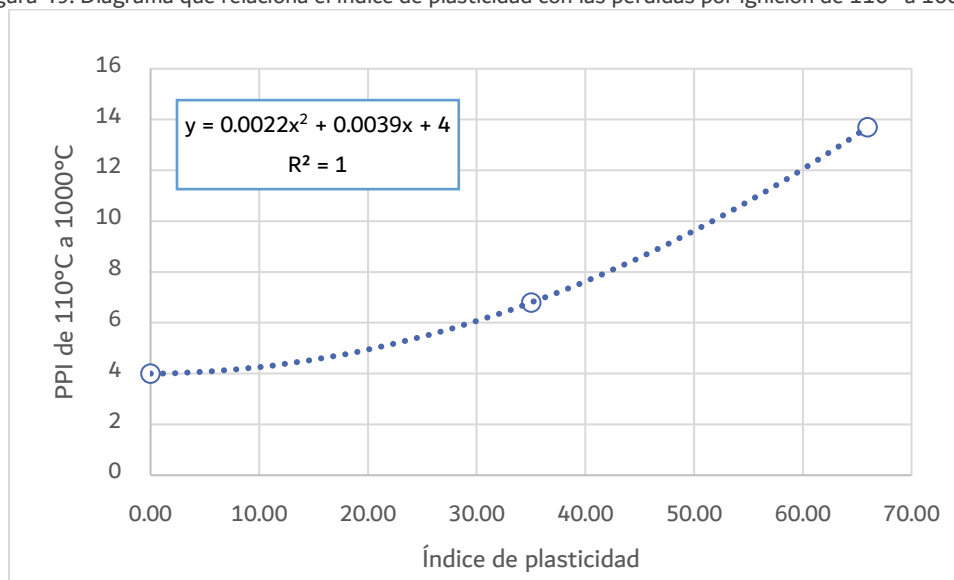
Este comportamiento es coherente con la naturaleza de los materiales arcillosos, ya que los suelos con mayor plasticidad tienden a retener más compuestos orgánicos en su estructura. Asimismo, la correlación positiva entre IP y LOI sugiere que los minerales arcillosos con alta capacidad de intercambio catiónico también tienen una mayor tendencia a adsorber y retener materia orgánica.

```
lm(formula = LOI ~ IP, data = datos)
Residuals:
    1      2      3 
0.7342 -1.5658  0.8316 

Coefficients:
            Estimate      Std. Error  t value    Pr(>|t|)
(Intercept)  3.26581      1.77290    1.842     0.317
IP           0.14558      0.04112    3.541     0.175
Residual standard error: 1.919 on 1 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9261,    Adjusted R-squared:  0.8523 
F-statistic: 12.54 on 1 and 1 DF, p-value: 0.1752
```

En este sentido, el análisis de regresión confirma que la plasticidad del suelo no solo está relacionada con su composición mineralógica, sino también con su contenido de materia orgánica, lo que influye directamente en su comportamiento térmico y mecánico.

Figura 49. Diagrama que relaciona el índice de plasticidad con las pérdidas por ignición de 110° a 1000°C.



En conclusión, los modelos desarrollados confirman que las arenas, debido a su alto contenido de SiO_2 , presentan una mayor conductividad térmica en comparación con los materiales arcillosos. Sin embargo, la humedad es un factor determinante en la conductividad térmica, ya que influye en la capacidad de absorción de agua entre las partículas del suelo. Se ha demostrado que la humedad es directamente proporcional a la conductividad térmica, mientras que el índice de plasticidad es inversamente proporcional. Es decir, a medida que aumenta la plasticidad del suelo, disminuye su capacidad para conducir calor.

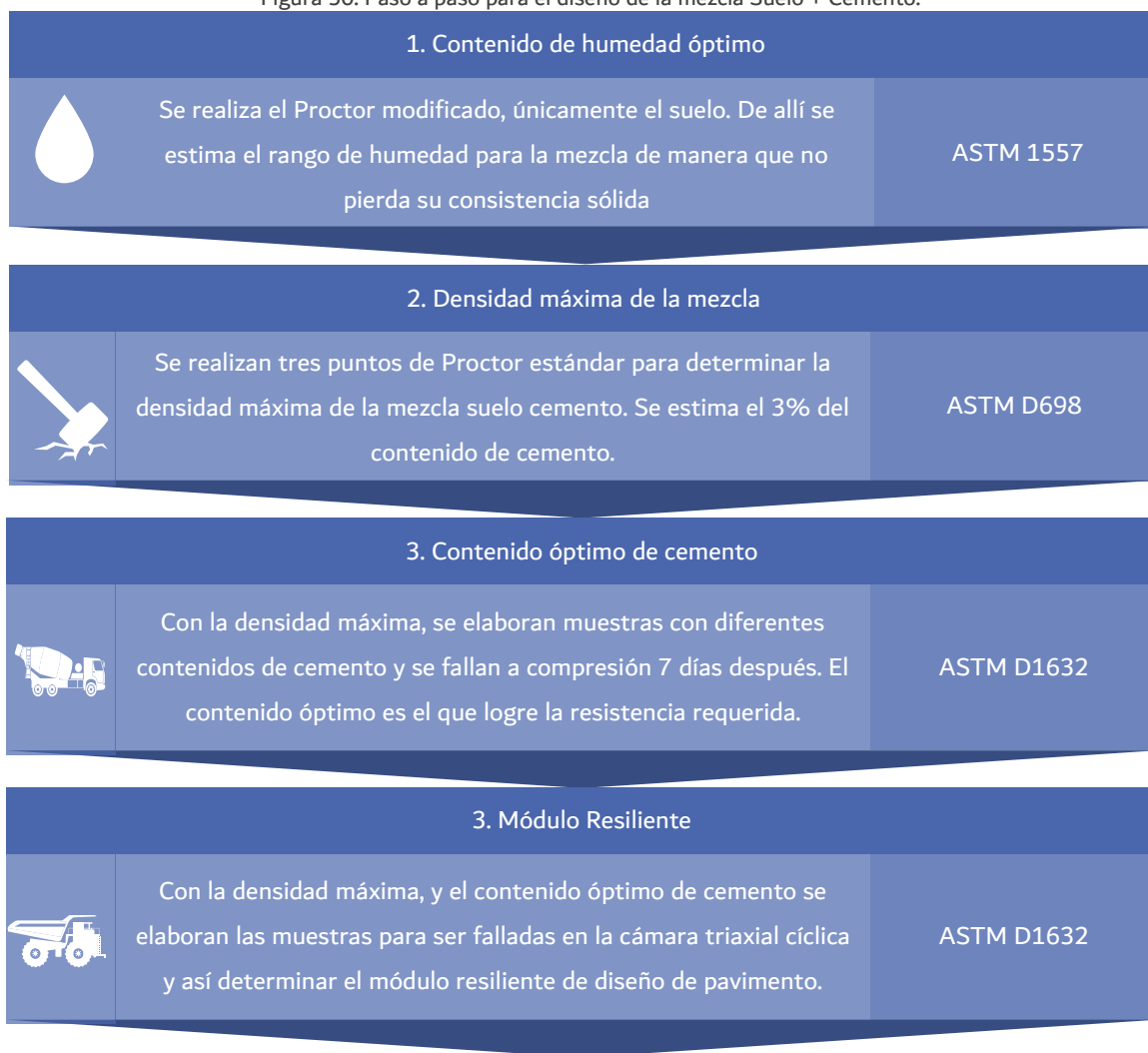
Además, el SiO_2 tiene una mayor capacidad de conducción térmica que el agua, lo que implica que, aunque una arcilla esté completamente saturada, no alcanzará la misma conductividad térmica que una arena húmeda y compacta.

Por otro lado, el índice de plasticidad presenta una correlación positiva con el contenido de materia orgánica, caolinita y Al_2O_3 , mientras que tiene una correlación negativa con el contenido de SiO_2 . Esto significa que los suelos con un mayor índice de plasticidad contienen menos cuarzo y más minerales arcillosos, lo que reduce su conductividad térmica. Estos hallazgos refuerzan la idea de que la plasticidad y la mineralogía del suelo juegan un papel clave en su comportamiento térmico.

3.3 INCREMENTO DE LA TEMPERATURA LIBERADA

Antes de iniciar el monitoreo de temperaturas, es fundamental definir el contenido óptimo de humedad y la proporción adecuada de cemento según los materiales utilizados. Aunque existen procedimientos estandarizados para diseñar mezclas de suelo-cemento hidráulico, se han identificado variaciones en la energía de compactación que afectan significativamente la porosidad y la densidad de las mezclas. Según la Tabla 4 , el diseño de la mezcla en laboratorio sigue los pasos detallados en la Figura 50.

Figura 50. Paso a paso para el diseño de la mezcla Suelo + Cemento.



A pesar de que la normatividad recomienda determinar primero la densidad máxima del suelo, se ha observado que un mayor contenido de cemento reduce la densidad de la mezcla. Esto se debe a que las partículas de cemento son más ligeras que las de arcilla, lo que impide cumplir estrictamente con la especificación de ASTM D1632, que establece que la muestra compactada debe alcanzar una altura de 142 mm con un peso unitario predefinido. Dado que la densidad de la mezcla varía según

el contenido de cemento y humedad, este procedimiento requiere ajustes para garantizar resultados representativos.

Otro desafío es lograr densidades similares en laboratorio cuando los métodos de compactación y el tamaño de las muestras varían. Por esta razón, se han desarrollado ajustes metodológicos basados en estudios previos [22] y optimizados en la presente investigación, con el fin de mejorar la precisión del diseño de mezclas y su aplicabilidad en campo.

3.3.1 Nueva metodología para el diseño de la mezcla

Paso 1. Secado de las muestras. El primer paso en la preparación de las muestras fue el secado a temperatura ambiente. Para esta investigación, se aprovechó el clima cálido de la zona, con temperaturas entre 30 y 38°C. Durante el proceso, los terrones de suelo fueron fracturados con herramienta menor para facilitar la evaporación del agua retenida y posteriormente se cubrieron con plástico negro, evitando así la contaminación por agentes externos.

Se observó que la arena se secó más rápidamente que la arcilla de baja plasticidad, debido a su menor capacidad de retención de agua. En contraste, la arcilla de alta plasticidad requirió un período de secado más prolongado, alcanzando su estado óptimo tras tres días de exposición a estas condiciones.

Figura 51. Secado de muestras en temperatura ambiente.



Paso 2. Preparación de las muestras. Se prepararon las muestras asegurando una distribución granulométrica adecuada. La arena fue tamizada a través del tamiz No. 16, logrando un tamaño máximo de partícula de 0.6 mm. Por otro lado, las arcillas fueron sometidas a un proceso de trituración y molienda para reducir su tamaño de partícula. Finalmente, se logró que las arcillas pasaran completamente por el tamiz No. 200 (0.075 mm), garantizando una textura fina y homogénea para su posterior mezcla con el cemento hidráulico.

Figura 52. Preparación de las muestras.



Paso 3. Dosificación. Se prepararon muestras de 1000 gramos, utilizando cuatro diferentes contenidos de cemento y, para cada uno, cuatro variaciones en el contenido de agua. Se estableció que el contenido máximo de agua no debía superar el 60% del límite líquido del suelo, con el objetivo de evitar excesos de humedad que pudieran afectar la trabajabilidad y la resistencia de la mezcla. La tabla correspondiente detalla las proporciones exactas utilizadas en cada combinación, garantizando un rango adecuado para evaluar el comportamiento de las muestras.

Tabla 16. Dosificación de las muestras de suelo cemento.

		Contenido de cemento			
		3%	6%	9%	16%
Contenido de agua	0%	SC-01	SC-02	SC-03	SC-04
	5%	SC-05	SC-06	SC-07	SC-08
	10%	SC-09	SC-10	SC-11	SC-12
	15%	SC-13	SC-14	SC-15	SC-16
	9%	CL-01	CL-02	CL-03	CL-04
	18%	CL-05	CL-06	CL-07	CL-08
	27%	CL-09	CL-10	CL-11	CL-12
	36%	CL-13	CL-14	CL-15	CL-16
	14%	CH-01	CH-02	CH-03	CH-04
	27%	CH-05	CH-06	CH-07	CH-08
	41%	CH-09	CH-10	CH-11	CH-12
	47%	CH-13	CH-14	CH-15	CH-16

Paso 4. Número de muestras por diseño. Se recomienda realizar al menos tres muestras por cada dosificación para garantizar resultados representativos y reducir la variabilidad en los datos. En esta investigación, debido a la inclusión de tres tipos de suelos diferentes, se fabricaron un total de 144 cilindros. Sin embargo, para un diseño estándar de una sola mezcla de suelo cemento, 48

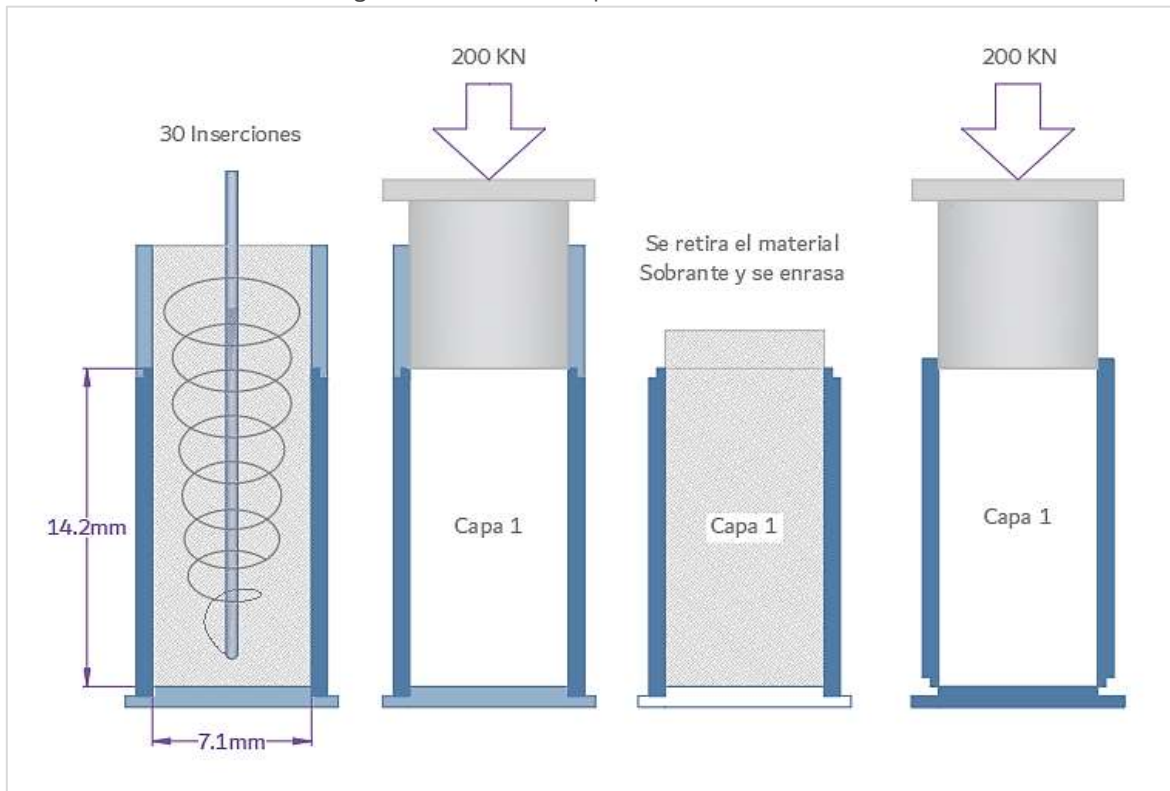
cilindros suelen ser suficientes para obtener datos confiables sobre resistencia y comportamiento mecánico.

Paso 5. Método de compactación. Se fabricaron cilindros con una relación altura-diámetro de 2:1, es decir, con 14.2 mm de altura y 7.1 mm de diámetro. El procedimiento inició con el ensamblaje de un molde cilíndrico compuesto por una base, un cuerpo con pestaña superior y un collar que se encajó en la pestaña.

La muestra fue colocada en el interior del molde en una sola capa y apisonada con una varilla de punta roma de 3/8" de diámetro, siguiendo un patrón en espiral de abajo hacia arriba. Posteriormente, el molde con la muestra fue trasladado a una prensa hidráulica, donde se aplicó una carga monotónica de 200 KN con un aditamento de compactación para asegurar la densidad deseada en la cara superior.

Después de esta primera compactación, se retiró el collar y el exceso de material, alisando la superficie hasta el nivel del molde. Luego, el cilindro fue girado 180° para repetir el proceso de compactación en la cara opuesta con la misma carga de 200 KN, asegurando una distribución homogénea de la densidad en toda la muestra.

Figura 53. Proceso de compactación de las muestras.



Paso 6. Extracción y curado. Inmediatamente después de la compactación, el molde fue trasladado a un extractor de muestras vertical. La extracción se efectuó en el mismo sentido de la segunda compactación para evitar daños estructurales en la muestra.

Una vez extraídas, las muestras fueron marcadas con vinilo, preferiblemente blanco, para una correcta identificación. Posteriormente, se envolvieron en vinipel para minimizar la pérdida de humedad y garantizar condiciones homogéneas de curado. Finalmente, las muestras fueron almacenadas en un cuarto húmedo con temperatura y humedad controladas, asegurando un curado adecuado hasta el momento de los ensayos de resistencia.

Figura 54. Extractor de muestras vertical.



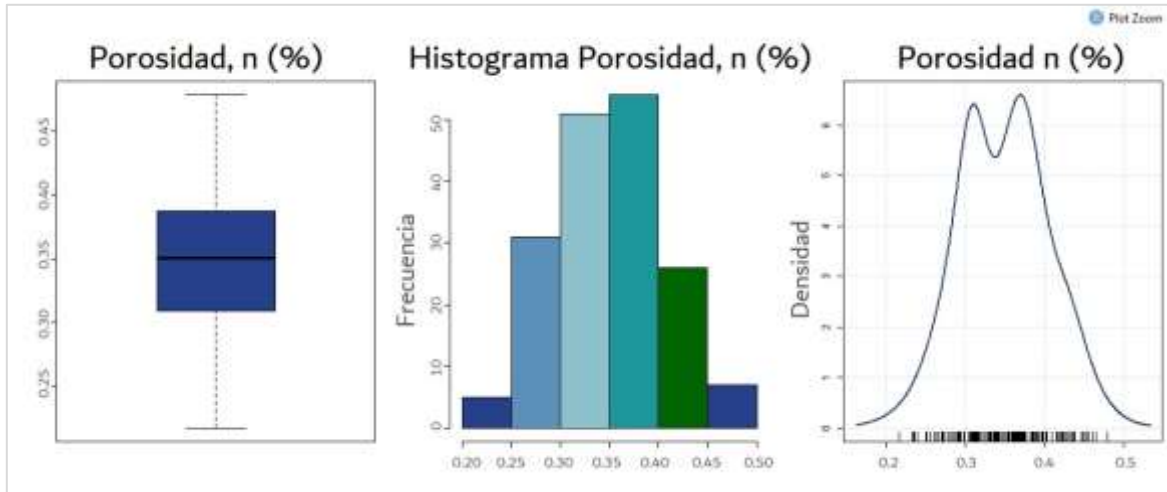
3.3.2 Variabilidad de la Porosidad

El análisis de la variabilidad de la porosidad permitió evaluar la influencia de la densidad, la relación de vacíos y la porosidad en la resistencia de las muestras compactadas con el nuevo método. Se revisaron los resultados obtenidos en los tres tipos de suelos con diferentes contenidos de cemento y agua, analizando un total de 174 muestras.

Tabla 17. Descripción numérica de la Porosidad de 174 muestras con diferentes características.

Media	0.3489	Mínimo	0.2167	Desviación	0.05636
Mediana	0.35028	Máximo	0.47857	Forma	0.03675
Moda	0.29229	Varianza	0.00318	Curtosis	-1.33657

Figura 55. Gráficos de cajas y bigotes, histograma y densidad de los valores de porosidad de las 174 muestras.



Los resultados indican que el método cumple satisfactoriamente con los criterios de variabilidad aceptados en las normas de ensayo. La diferencia entre los valores máximos y la media, así como entre los valores mínimos y la media, fue del 10%, lo que se encuentra dentro de los límites permitidos. La distribución de frecuencias en el histograma mostró una centralidad en los resultados, con un sesgo leve del 0.036, equivalente al 11% hacia la izquierda. Asimismo, la prueba de curtosis evidenció un ligero desplazamiento en la curva de densidad hacia la izquierda, lo que indica una distribución platicúrtica con colas ligeras y un pico más suave en comparación con la distribución normal. Esta característica se atribuye a la variabilidad en la composición de las mezclas.

El análisis de varianza (ANOVA) se utilizó para identificar las variables que influyen en la resistencia de las muestras. Se evaluaron el índice de plasticidad del suelo, la densidad seca, la porosidad y la relación de vacíos. Los resultados indicaron que la densidad seca tuvo un impacto significativo en la resistencia, mientras que la porosidad y la relación de vacíos no mostraron una influencia estadísticamente significativa, registrando un valor de probabilidad (Pr) mayor a 0.05.

Código R Studio 1

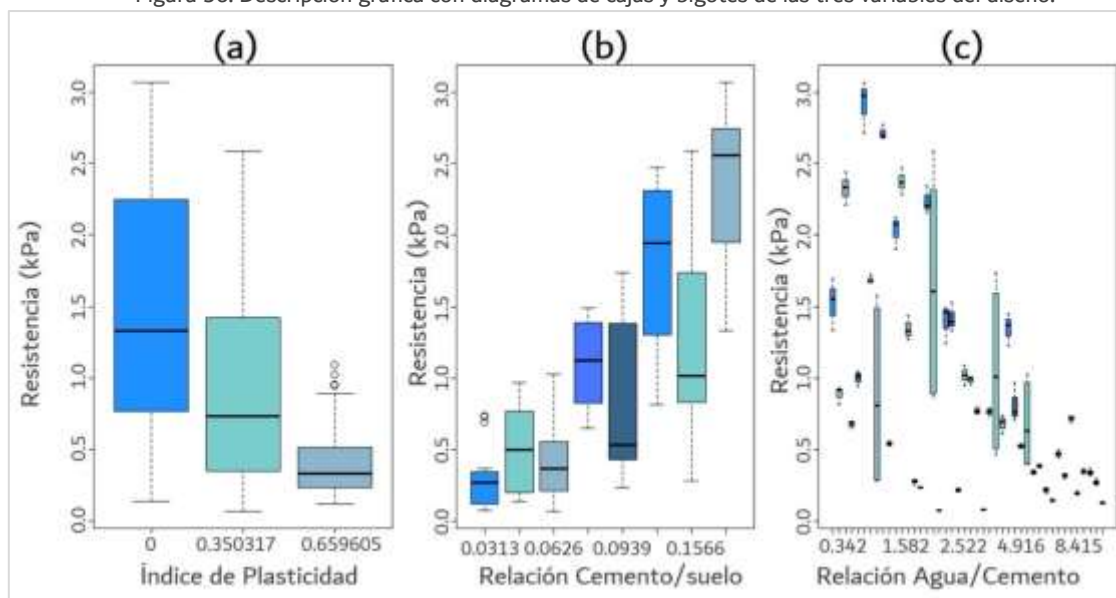
```
summary(aov)
Df      sum Sq  Mean Sq  F value    Pr(>F)
Soil      1    38.96    38.96   101.395 < 2e-16 ***
Density   1     9.51     9.51    24.741 1.6e-06 ***
n         1     0.07     0.07     0.184 0.668
e         1     1.01     1.01     2.637 0.106
Residuals 169    64.93          0.38
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Por último, la varianza de los resultados de porosidad dentro de muestras con las mismas características de mezclado se mantuvo por debajo del 8%, valor admisible según los estándares del ensayo. Estos hallazgos confirman la estabilidad del método de compactación y la consistencia de las mezclas en términos de densidad y resistencia mecánica.

3.3.3 Relación Agua cemento

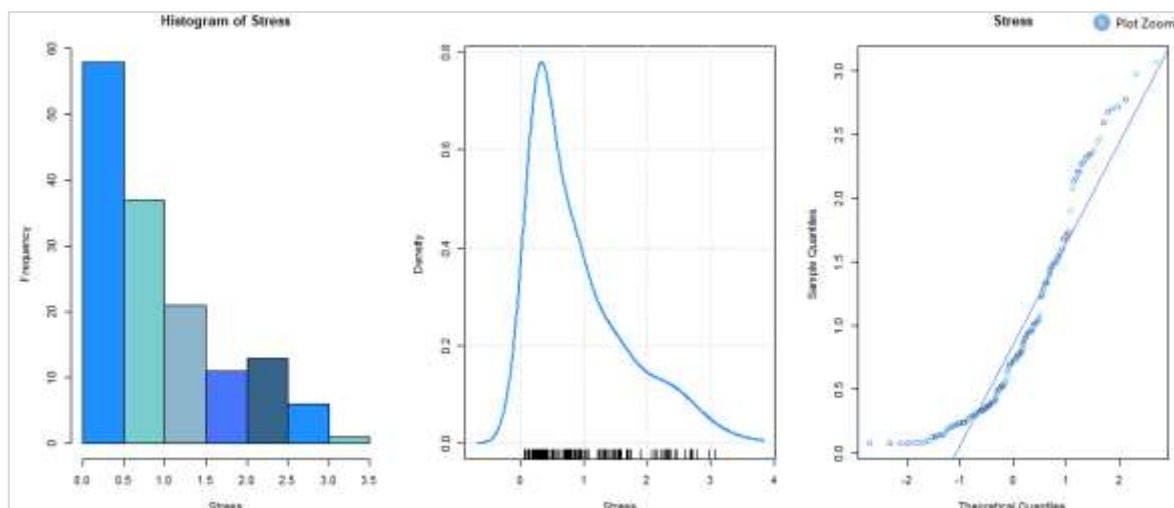
El análisis de la relación agua-cemento confirmó que el aumento en el contenido de cemento favorece el crecimiento de la resistencia a la compresión, mientras que un mayor índice de plasticidad y un mayor contenido de agua generan una reducción en la resistencia. A pesar de tratarse de materiales con diferentes características, los resultados muestran una tendencia similar en todas las muestras, evidenciando un patrón de crecimiento de la resistencia en función del contenido de cemento. Sin embargo, el contenido de humedad presentó una mayor dispersión en los resultados.

Figura 56. Descripción gráfica con diagramas de cajas y bigotes de las tres variables del diseño.



La distribución de frecuencias de los resultados exhibió un comportamiento leptocúrtico sesgado a la derecha, con una aparente normalidad.

Figura 57. Distribución de frecuencias, densidad y normalidad de las Resistencias a la compresión obtenidas.



Para modelar la relación entre los parámetros estudiados y la resistencia a la compresión, se utilizó un modelo estadístico que demostró que el contenido de cemento, la relación agua-cemento y el índice de plasticidad afectan significativamente la resistencia de la mezcla. No obstante, para asegurar la validez estadística del modelo y cumplir con los criterios establecidos, se realizó una corrección de -1, obteniendo una confiabilidad del 86%.

Código R Studio 2

```
lm(formula = Stress ~ Cement_Soil + Water_Cement + IPT - 1, data = datos)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.93572 -0.30529  0.06768  0.36832  1.12367

Coefficients:
              Estimate      Std. Error    t value    Pr(>|t|)
Cement_Soil   16.21820      0.63678     25.469    < 2e-16 ***
Water_Cement   0.08259      0.01100      7.507    5.78e-12 ***
IPT           -0.32592      0.02996    -10.878    < 2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.4414 on 144 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8676,    Adjusted R-squared:  0.8648
F-statistic: 314.5 on 3 and 144 DF, p-value: < 2.2e-16
```

La ecuación resultante para el diseño de la mezcla se expresa de la siguiente manera:

Ecuación 7. Modelo para calcular la resistencia de la mezcla en función del Índice de plasticidad, la relación agua cemento y el contenido de cemento de la mezcla.

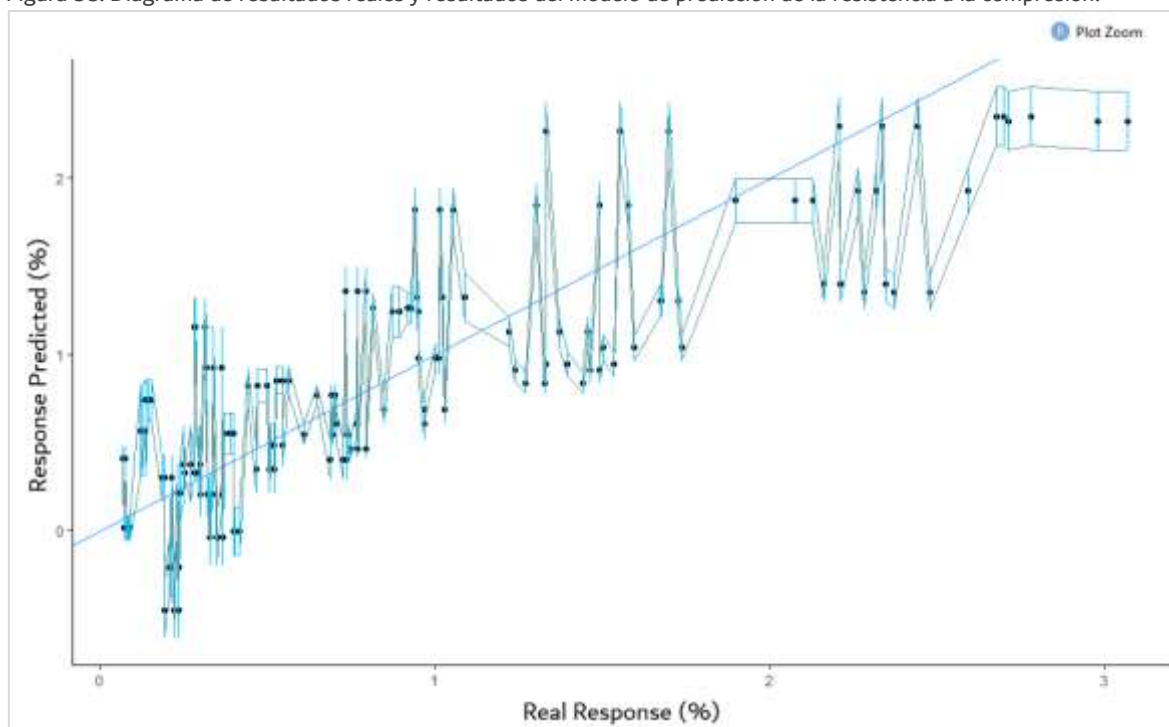
$$\sigma_c = 0.08259 \frac{W}{C} + 16.2182 \frac{C}{S} - 0.32592(IP + 1)^3 - 1$$

donde:

- σ_c es la resistencia a la compresión en MPa,
- W/C es la relación entre la masa de agua (g) y la masa de cemento (g),
- C/S es la relación entre la masa de cemento (g) y la masa del suelo seco (g),
- IP es el índice de plasticidad en porcentaje.

El modelo se considera válido dentro del rango de resistencia de 0 a 3 MPa.

Figura 58. Diagrama de resultados reales y resultados del modelo de predicción de la resistencia a la compresión.



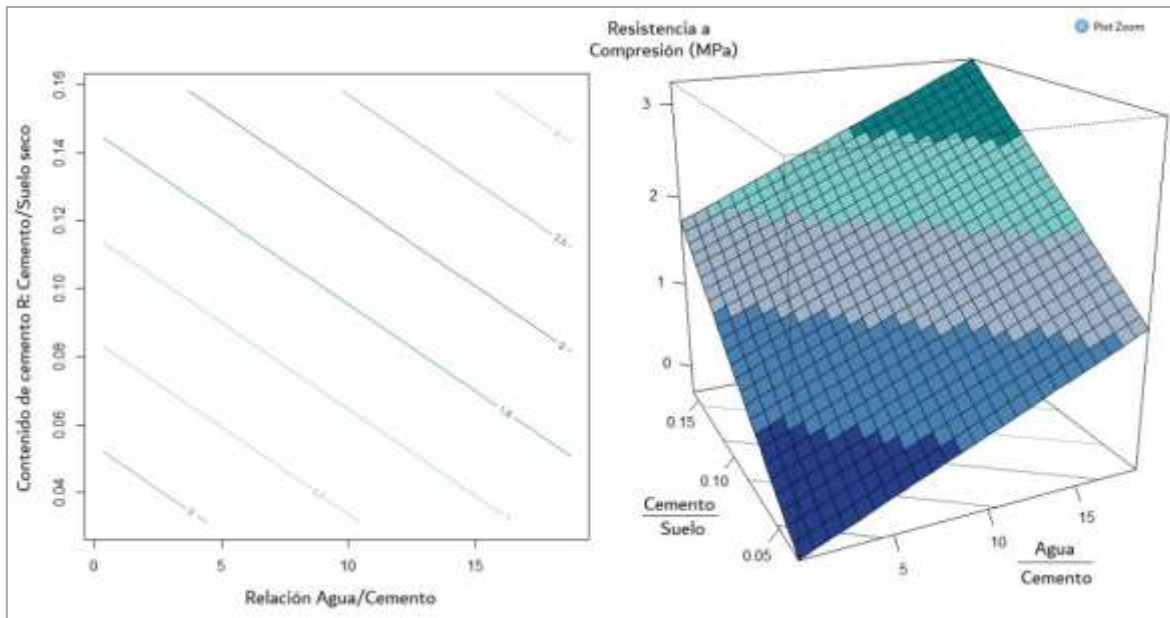
Tras validar los supuestos y realizar las correcciones necesarias, se compararon los resultados reales obtenidos en los ensayos de laboratorio con los valores predichos por el modelo. La representación gráfica de estos datos mostró una buena correspondencia entre los valores experimentales y los calculados (Figura 58).

Tabla 18. Validación de los supuestos del modelo de la Resistencia en función con el IP y la relación agua cemento.

Validación de los Supuestos				
Multicolinealidad	2.892209	3.261939	Se rechaza	No hay multicolinealidad
Especificación	1.5851	0.2085	No se rechaza	Está bien especificado
Homocedasticidad	0.8626	0.7319	No se rechaza	Residuos homocedásticos
Normalidad	0.075388	0.3737	No se rechaza	Tiene distribución normal

En la Figura 59, la superficie de respuesta refleja un comportamiento lineal entre el contenido de cemento, la relación agua-cemento y la resistencia a la compresión, lo que confirma la robustez del modelo en la predicción de la resistencia mecánica de las mezclas estudiadas.

Figura 59. Superficie de respuesta, X: Relación Agua cemento, Z: Contenido de cemento, Y Resistencia a la compresión en MPa un IP= 35.

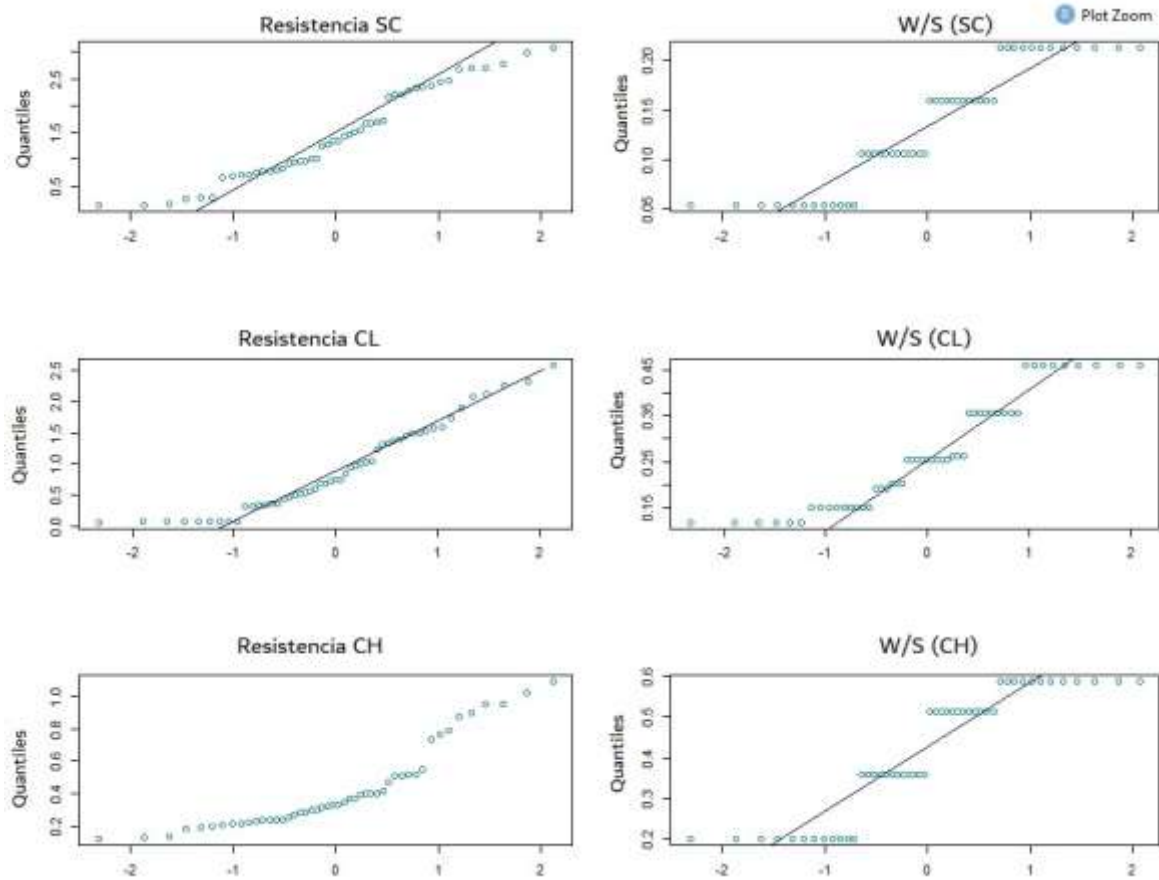


3.3.4 Contenido de humedad óptimo

El análisis del contenido óptimo de humedad reveló que la humedad no solo influye en la resistencia de la mezcla, sino también en su densidad máxima. Un bajo contenido de humedad produce una mezcla seca difícil de compactar, mientras que un exceso de humedad genera hinchamiento y acolchamiento en el pavimento, además de problemas posteriores como fisuras por contracción y fallas estructurales.

Para determinar el contenido óptimo de humedad, se desarrollaron modelos específicos para cada tipo de suelo, tomando en cuenta que cada índice de plasticidad representa un rango diferente de humedad óptima.

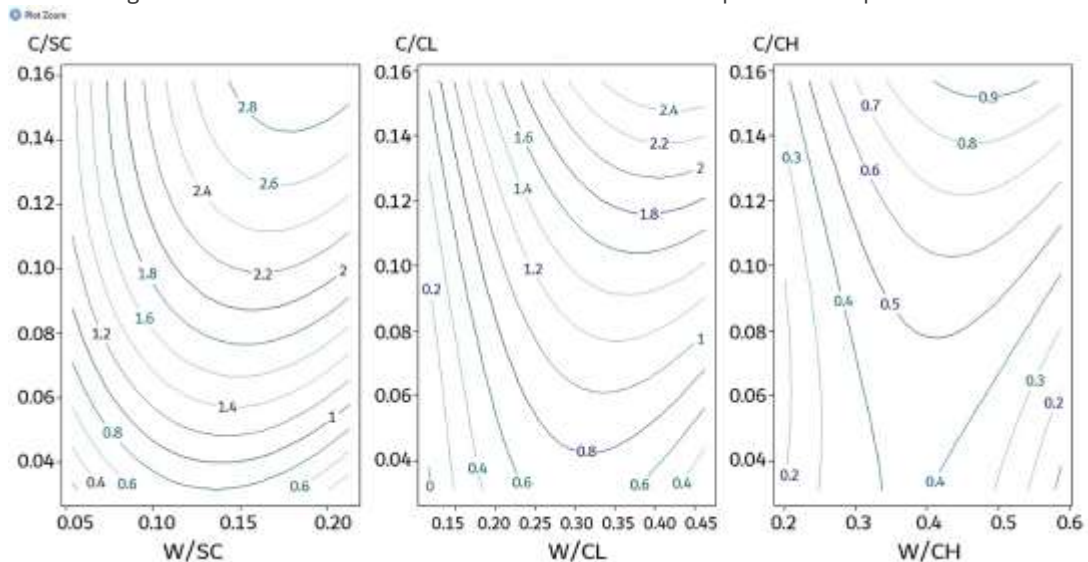
Figura 60. Normalidad de las variables.



Donde, Strain: Resistencia en MPA, W/S: Contenido de agua de la mezcla y C/S: Contenido de cemento.

Antes de validar el modelo de correlación, se revisó la normalidad de las variables. Es necesario señalar que se usaron los mismos resultados del diseño de la mezcla, definidos en la Tabla 16.

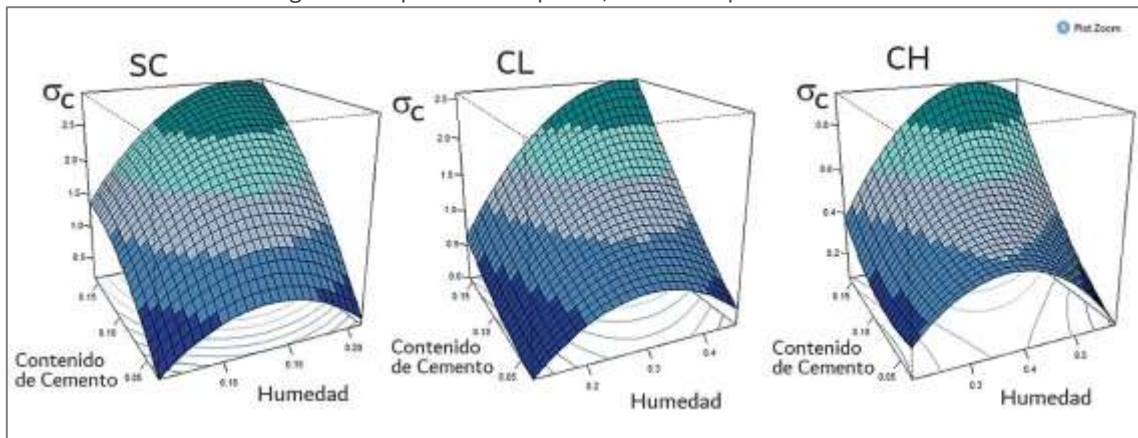
Figura 61. Gráfica de contornos de los contenidos de humedad para los tres tipos de suelos.



Como se muestra en la Figura 61 y en la Figura 62, se modeló una superficie de respuesta para cada material en función de la relación Agua/Suelo seco (W/S), evidenciando que la curvatura de la superficie de respuesta varía con el índice de plasticidad. Mientras que la arena arcillosa con IP=0 presenta una curvatura menos pronunciada, indicando un rango de humedad óptima más amplio, la arcilla de alta plasticidad muestra una concavidad más cerrada, lo que significa que cualquier variación en el contenido de agua puede afectar significativamente la resistencia y la densidad. La arcilla de plasticidad media presenta una curvatura intermedia entre los dos extremos.

Para validar estos resultados, se establecieron tres modelos de regresión que relacionan el contenido de cemento y agua con la resistencia a la compresión para cada tipo de suelo.

Figura 62. Superficie de respuesta, contenido óptimo de humedad.



Modelo para arena arcillosa (SC)

on un $R^2 = 95\%$ y un margen de error de 0.0098.

Ecuación 8. Resistencia a la compresión en MPa de suelos SC, donde C es masa de cemento, W es agua y Ss es masa de suelo seco.

$$\sigma_{SC} = -1.05035 + 23.06507 \frac{C}{S_s} + 19.19359 \frac{W}{S_s} + 74.15867 \frac{C \cdot W}{S_s} - 85.56135 \left(\frac{C}{S_s} \right)^2 - 95.656 \left(\frac{W}{S_s} \right)^2$$

Donde σ_{sc} , es la resistencia a la compresión en MPa, C es la masa de cemento en gramos, W es la masa de agua en gramos, y Ss es la masa del suelo seco en gramos.

Código R Studio 3

```
rsm(formula = Strain_SC ~ SO(C_SC, w_SC), data = SC)
```

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	-1.05035	0.22495	-6.7242	3.610e-08	***
C_SC	23.06507	3.27563	6.2206	1.912e-07	***
W_SC	19.19359	2.75585	8.4850	1.190e-10	***
C_SC:W_SC	74.15867	9.77057	7.3253	4.997e-09	***
C_SC^2	-85.56135	15.18921	-5.1334	6.897e-06	***
W_SC^2	-95.656	9.69393	-9.7197	2.603e-12	***

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Multiple R-squared:  0.9568,    Adjusted R-squared:  0.9516
F-statistic: 185.9 on 5 and 42 DF, p-value: < 2.2e-16
```

Analysis of Variance Table

Response: Strain_SC

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FO(C_SC, W_SC)	2	26.2746	13.1373	377.461	< 2.2e-16
TWI(C_SC, W_SC)	1	1.8676	1.8676	53.660	4.997e-09
PQ(C_SC, W_SC)	2	4.2052	2.1026	60.412	4.386e-13
Residuals	42	1.4618	0.0348		
Lack of fit	10	1.1481	0.1148	11.712	3.978e-08
Pure error	32	0.3137	0.0098		

Modelo para arcilla arenosa (CL)

Con un $R^2=94\%$ $R^2 = 94\%$ y un margen de error de 0.007.

Código R Studio 4

```
rsm(formula = Strain_CL ~ SO(C_CL, W_CL), data = CL)
```

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	-1.0732	0.19397	-5.2905	3.477e-06	***
C_CL	-2.7341	3.01847	-1.8020	0.07824	.
W_CL	9.4205	1.33916	8.1699	1.953e-10	***
C_CL:W_CL	25.1071	5.13186	7.8039	6.660e-10	***
C_CL^2	-6.6910	13.81948	2.2350	0.03043	*
W_CL^2	-16.2704	2.11381	-9.4432	3.033e-12	***

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Multiple R-squared:  0.9492,    Adjusted R-squared:  0.9436
F-statistic: 168.2 on 5 and 45 DF, p-value: < 2.2e-16
```

Analysis of Variance Table

Response: Strain_CL

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FO(C_CL, W_CL)	2	18.0542	9.0271	336.481	< 2.2e-16
TWI(C_CL, W_CL)	1	2.0452	2.0452	76.235	3.048e-11
PQ(C_CL, W_CL)	2	2.4587	1.2294	45.824	1.400e-11
Residuals	45	1.2073	0.0268		
Lack of fit	10	0.9617	0.0962	13.709	2.218e-09
Pure error	35	0.2455	0.0070		

Stationary point of response surface:

C_CL	W_CL
-0.05430208	0.21957698

Eigenanalysis:

eigen() decomposition

\$values

[1] 37.82554 -26.89996

\$vectors

	[,1]	[,2]
C_CL	-0.9448788	0.3274203
W_CL	-0.3274203	-0.9448788

Ecuación 9. Resistencia a la compresión en MPa de suelos CL, donde C es masa de cemento, W es agua y S_s es masa de suelo seco.

$$\sigma_{CL} = -1.0732 - 2.7341 \frac{C}{S_s} + 9.4205 \frac{W}{S_s} + 25.1071 \frac{C \cdot W}{S_s} - 6.6910 \left(\frac{C}{S_s} \right)^2 - 16.2704 \left(\frac{W}{S_s} \right)^2$$

Donde σ_{CL} , es la resistencia a la compresión en MPa, C es la masa de cemento en gramos, W es la masa de agua en gramos, y Ss es la masa del suelo seco en gramos.

Modelo para arcilla de alta plasticidad (CH)

Con un $R^2=94\%$ $R^2 = 94\%$ $R^2=94\%$, validando su aplicabilidad estadística.

Código R Studio 5

```
rsm(formula = Strain_CH ~ SO(C_CH, w_CH), data = CH)

              Estimate      Std. Error      t value      Pr(>|t|)
(Intercept) -0.99815      0.09933      -4.2300      0.0001238 ***
C_CH         -5.89264      1.12009      -4.9158      1.398e-05 ***
W_CH         5.88862      0.46370      10.5204      2.415e-13 ***
C_CH:W_CH    10.2887      1.27097      9.9917      1.150e-12 ***
C_CH^2       19.07801      5.03896      4.5511      4.507e-05 ***
W_CH^2       -6.12125      0.56829     -12.5156      9.236e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Multiple R-squared:  0.9505,    Adjusted R-squared:  0.9446
F-statistic: 161.3 on 5 and 42 DF,  p-value: < 2.2e-16

Analysis of Variance Table

Response: Strain_CH
              Df    Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
FO(C_CH, W_CH)  2  1.95440  0.97720  264.780 < 2.2e-16
TWI(C_CH, W_CH)  1  0.36845  0.36845   99.835 1.150e-12
PQ(C_CH, W_CH)  2  0.65454  0.32727   88.677 8.398e-16
Residuals      42  0.15501  0.00369
Lack of fit     10  0.13249  0.01325   18.825 1.061e-10
Pure error      32  0.02252  0.00070
```

Ecuación 10. Resistencia a la compresión en MPa de suelos CH, donde C es masa de cemento, W es agua y Ss es masa de suelo seco.

$$\sigma_{CH} = -0.99815 - 5.89264 \frac{C}{S_s} + 5.88862 \frac{W}{S_s} + 10.2887 \frac{C \cdot W}{S_s} + 19.07801 \left(\frac{C}{S_s} \right)^2 - 6.12125 \left(\frac{W}{S_s} \right)^2$$

Donde σ_{CH} , es la resistencia a la compresión en MPa, C es la masa de cemento en gramos, W es la masa de agua en gramos, y Ss es la masa del suelo seco en gramos.

Estos modelos permiten predecir con precisión la resistencia a la compresión de mezclas de suelo-cemento en función de su contenido de humedad y cemento, facilitando la optimización de los diseños de mezclas según el tipo de residuo arcilloso. A manera de resumen se consolidan en la siguiente tabla los tres modelos para el diseño de mezclas de diferentes residuos arcillosos:

Tabla 19. Resumen de los modelos desarrollados para el diseño de la mezcla

Suelo	Intercepto	$\frac{C}{S_s}$	$\frac{W}{S_s}$	$\frac{C \cdot W}{S_s}$	$\left(\frac{C}{S_s} \right)^2$	$\left(\frac{W}{S_s} \right)^2$	R ²
SC	-1.05035	23.06507	19.19359	74.15867	-85.56135	-95.656	0.9516
CL	-1.0732	-2.7341	9.4205	25.1071	-6.6910	-16.2704	0.9436
CH	-0.99815	-5.89264	5.88862	10.2887	19.07801	-6.12125	0.9946

Donde, C=Masa cemento (gr), W= Masa de agua (gr), Ss= Masa del suelo seco (gr)

3.3.5 Temperatura de reacción exotérmica

El comportamiento exotérmico de los materiales cementantes es crucial en la hidratación del cemento hidráulico, ya que la liberación de calor puede generar contracción térmica y esfuerzos por retracción si no se gestiona adecuadamente. Esta reacción química está influenciada por el contenido de agua en la mezcla, siendo la relación agua/cemento un factor determinante. Esta relación, que se obtiene dividiendo la cantidad de agua entre la cantidad de cemento en peso, influye directamente en la fluidez de la mezcla: a mayor relación agua/cemento, la mezcla es más fluida, pero su resistencia mecánica disminuye.

En el caso de las mezclas de suelo cemento, que tienen una consistencia seca y bajo contenido de agua en comparación con los concretos convencionales, la liberación de temperatura no solo depende de la cantidad de cemento, sino también de la conductividad térmica del suelo y su grado de compactación. Por ello, comprender cómo se desarrolla la temperatura en función de estos parámetros es esencial para optimizar el diseño de mezclas y evitar defectos estructurales derivados del calor de hidratación.

Debido a la naturaleza seca de las mezclas de suelo cemento, el desarrollo de las reacciones químicas y la liberación de temperatura presentan un comportamiento distinto al de los concretos hidráulicos convencionales. En estas mezclas, el bajo contenido de agua limita la velocidad de hidratación del cemento, haciendo que la generación de calor dependa no solo del contenido de cemento, sino también de la conductividad térmica del suelo y su grado de compactación.

Para analizar este fenómeno, en este estudio se monitoreó la evolución de temperatura en nueve muestras con diferentes tipos de suelo y distintos contenidos de cemento (6%, 9% y 16% en peso). Las temperaturas se registraron cada 15 minutos durante las primeras 32 horas tras la preparación de las muestras, utilizando el contenido de humedad óptimo determinado en el diseño de mezclas descrito en el apartado 3.3.4. Los datos obtenidos permitieron evaluar cómo varían los picos de temperatura en función de la composición del suelo y la proporción de cemento, proporcionando información clave para optimizar la estabilidad térmica y estructural de las mezclas en aplicaciones constructivas.

Tabla 20. Dosificación de las muestras usadas para el monitoreo de temperaturas

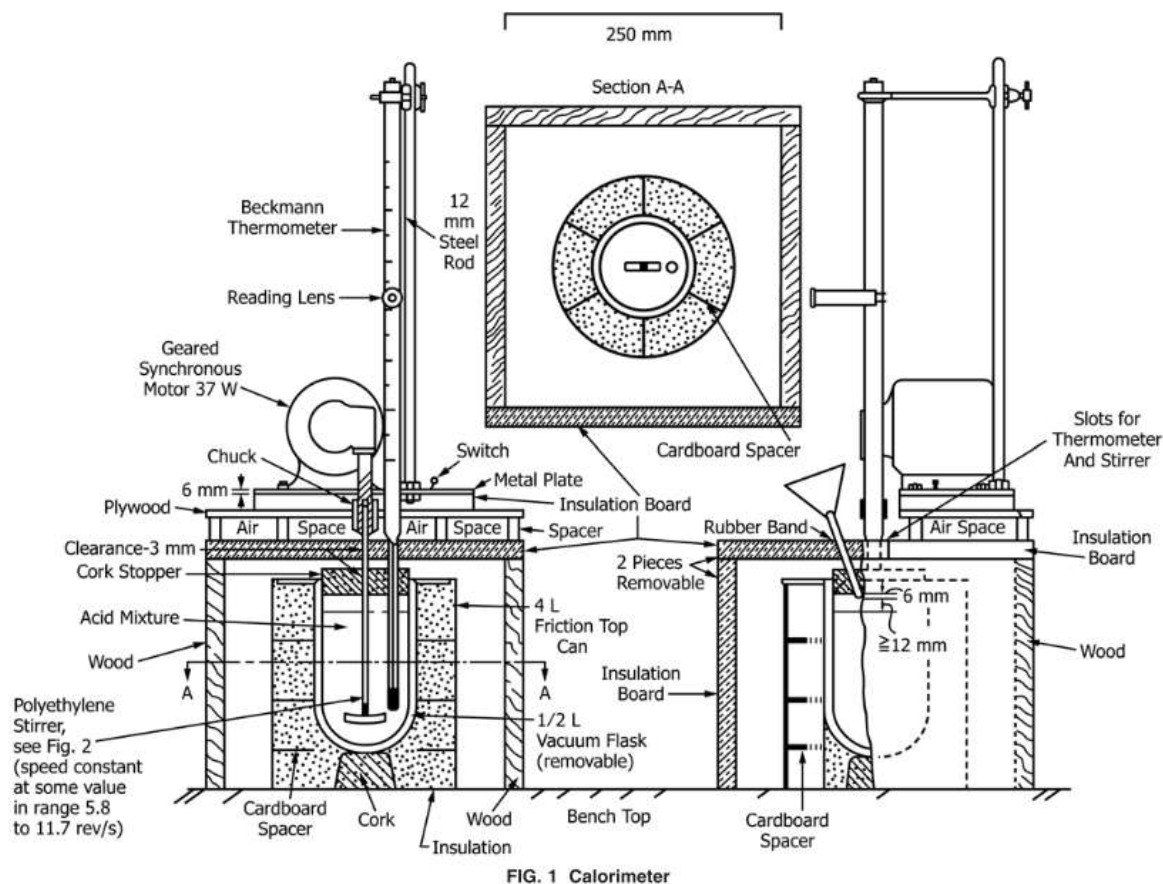
Muestra	Suelo	Suelo Seco	Cemento	Agua	R W/S	R W/C	R C/S
SC-M1	860.0 gr	833.4 gr	50.0 gr	86.3 gr	0.103	2.257	0.060
SC-M2	810.0 gr	785.0 gr	70.6 gr	113.6 gr	0.145	1.962	0.090
SC-M3	760.0 gr	736.5 gr	117.8 gr	108.3 gr	0.147	1.119	0.160

CL-M1	900.0 gr	783.1 gr	47.0 gr	133.1 gr	0.170	5.319	0.060
CL-M2	870.0 gr	757.0 gr	68.1 gr	143.0 gr	0.189	3.758	0.090
CL-M3	800.0 gr	696.1 gr	111.4 gr	169.3 gr	0.243	2.453	0.160
CH-M1	1000.0 gr	959.5 gr	57.6 gr	316.5 gr	0.330	6.201	0.060
CH-M2	1000.0 gr	959.5 gr	86.4 gr	355.0 gr	0.370	4.580	0.090
CH-M3	1000.0 gr	959.5 gr	153.5 gr	397.4 gr	0.414	2.852	0.160

Donde $R W/S$ es la relación Agua/Suelo, $R W/C$ es la relación Agua/cemento y $R C/S$ es el contenido de cemento en la mezcla.

La norma ASTM C186-17 establece que el calorímetro para medir la cantidad de calor liberado por el cemento durante su hidratación debe contar con un frasco de vacío con un tapón de corcho o material no reactivo, colocado dentro de un contenedor térmicamente aislado. Este aislamiento puede lograrse con materiales como espuma no reactiva, algodón o fibra de vidrio, que minimizan la influencia de la temperatura ambiente en las mediciones como se muestra en la Figura 63.

Figura 63. Diagrama de un calorímetro de acuerdo con la norma de ensayo ASTM C186-17



Sin embargo, debido a las diferencias en la conductividad térmica y la compactación de las mezclas de suelo cemento, para este estudio fue necesario ajustar el método tradicional. Se diseñó una

cámara semiadiabática que permitiera evaluar con mayor precisión la temperatura interna de las muestras sin que factores externos alteraran los resultados. Esta adaptación incluyó el uso de materiales aislantes específicos y una disposición que facilitara la inserción de sensores térmicos, asegurando la precisión en la medición de la evolución de temperatura a lo largo del tiempo.

Para identificar la temperatura interna de la mezcla, se diseñó una cámara semiadiabática con dimensiones diferentes a las establecidas en la norma ASTM C186-17 para cementos hidráulicos. Esta modificación fue necesaria debido a la variabilidad en la conductividad térmica de las mezclas de suelo cemento, que depende de factores como la compactación, el contenido de humedad y el tipo de suelo.

Para minimizar la influencia de la temperatura ambiente y mejorar la precisión de las mediciones, se implementaron las siguientes adaptaciones en la cabina:

Recubrimiento de las muestras. Se perforaron las probetas en la cara superior hasta una profundidad de 4 cm para insertar una termocupla, protegida por una pajilla plástica. Posteriormente, cada muestra fue envuelta en tres capas de papel de vinilo para reducir la pérdida de calor.

Figura 64. Preparación de las muestras de suelo cemento.



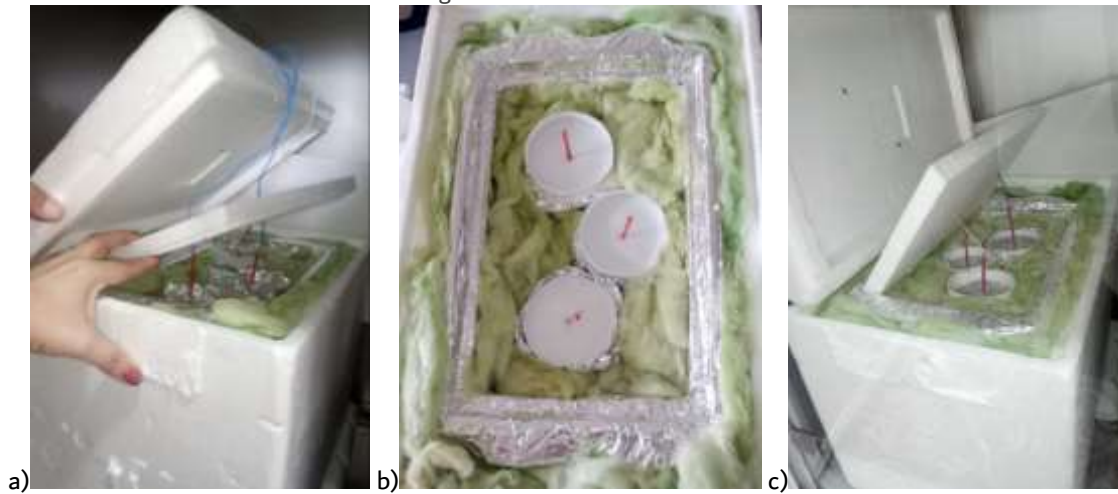
Envoltura en material aislante. Se elaboraron contenedores de tres capas, con una capa interna de caucho EVA (polímero termoplástico esponjoso y flexible que se adapta a la forma de las probetas), una segunda capa de algodón y una capa externa de papel aluminio para reflejar el calor, como se muestra en la Figura 65.

Figura 65. Envoltura de las muestras en material aislante.



Contenedor térmico. Las muestras fueron colocadas en cajas de poliestireno expandido (icopor), con un recubrimiento interno de papel aluminio y lana mineral para mejorar el aislamiento térmico. Se ubicaron en grupos de tres dentro de cada caja, y se utilizó una lámina superior de icopor para fijar las pajillas que contenían las termocuplas como se observa en la Figura 66.

Figura 66. Contenedor aislado



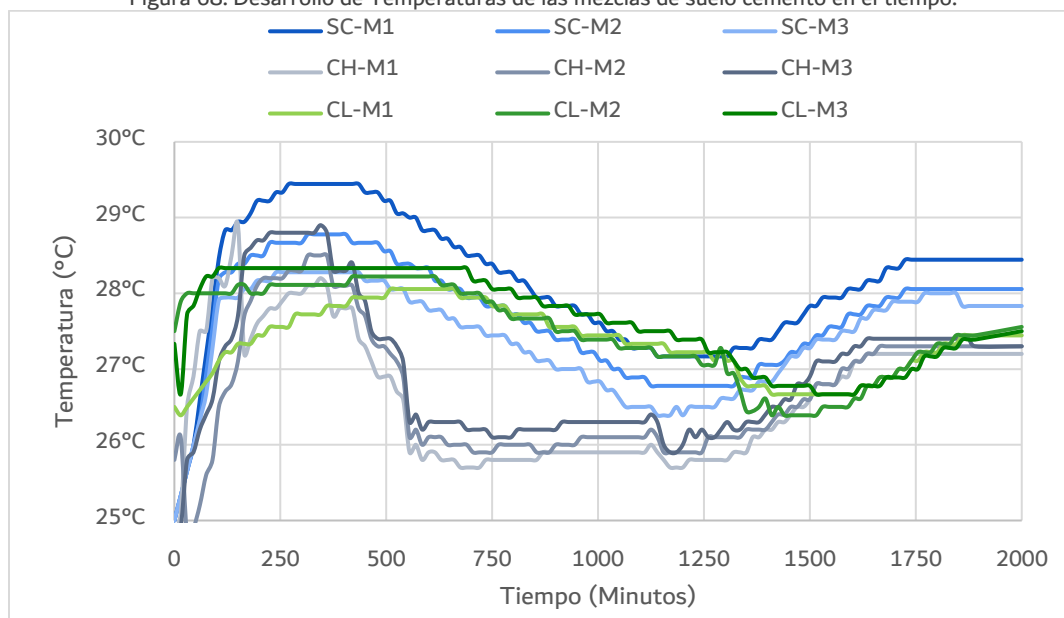
Cabina de curado. Por último, luego de sellar herméticamente la caja de icopor, se ubicó en una cabina de curado con todas las termocuplas y el Datalogger, pero en esta ocasión la cabina no se encendió ni se gradúo una temperatura específica ni se activaron los humificadores. Para determinar la temperatura ambiente, se instaló la cuarta termocupla dentro de la cabina de curado fuera la caja de icopor (Figura 67c). Aunque el experimento no buscaba medir el efecto de la temperatura ambiente, se instaló únicamente para tener un valor de referencia dentro de la cabina.

Figura 67. Cabina semiadiabática para el monitoreo de temperaturas de reacción exotérmica.



La manera más sencilla para medir la liberación de temperatura en un rango de tiempo de 32 horas fue sacando el área bajo la curva. Como se muestra en Figura 68, la temperatura varía en función del tiempo hasta lograr mantenerse en una temperatura constante. Antes de iniciar el monitoreo de temperaturas, se midió la conductividad térmica de cada una de las muestras, con el fin de identificar su efecto en el proceso.

Figura 68. Desarrollo de Temperaturas de las mezclas de suelo cemento en el tiempo.



Antes de validar un modelo de correlación es necesario revisar la normalidad de los datos obtenidos y la relación entre la temperatura monitoreadas. En la Figura 69, se presentan las representaciones gráficas de los resultados. Se define la **temperatura exotérmica (T_e)** como el área bajo la curva de la temperatura monitoreada durante 32 horas, restando la temperatura ambiente, que en este caso

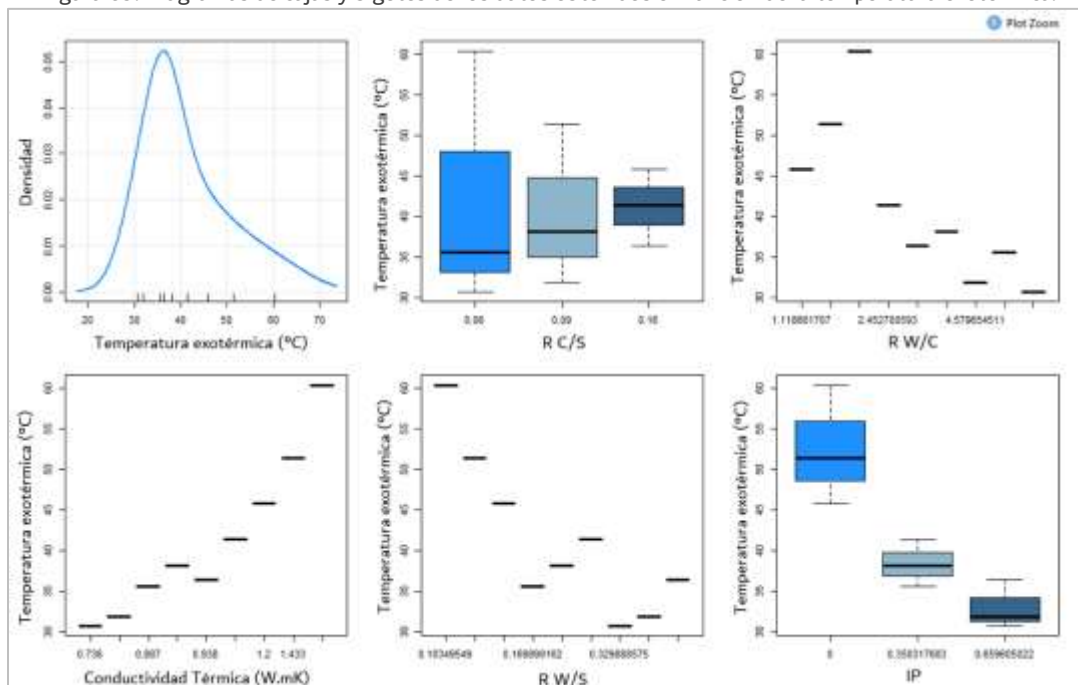
es de 25°C. Este valor representa la cantidad de calor acumulado en la mezcla debido a la reacción exotérmica del cemento.

El análisis estadístico muestra que los datos de la temperatura exotérmica (T_e) siguen una distribución normal leptocúrtica, con una ligera asimetría hacia la izquierda. Además, se observa que la temperatura exotérmica varía en función del contenido de cemento. Curiosamente, al aumentar el contenido de cemento o la relación cemento/suelo (R C/S), la dispersión de los datos disminuye, mientras que la media de la temperatura exotérmica aumenta (Figura 69).

Se identifican además otras relaciones significativas:

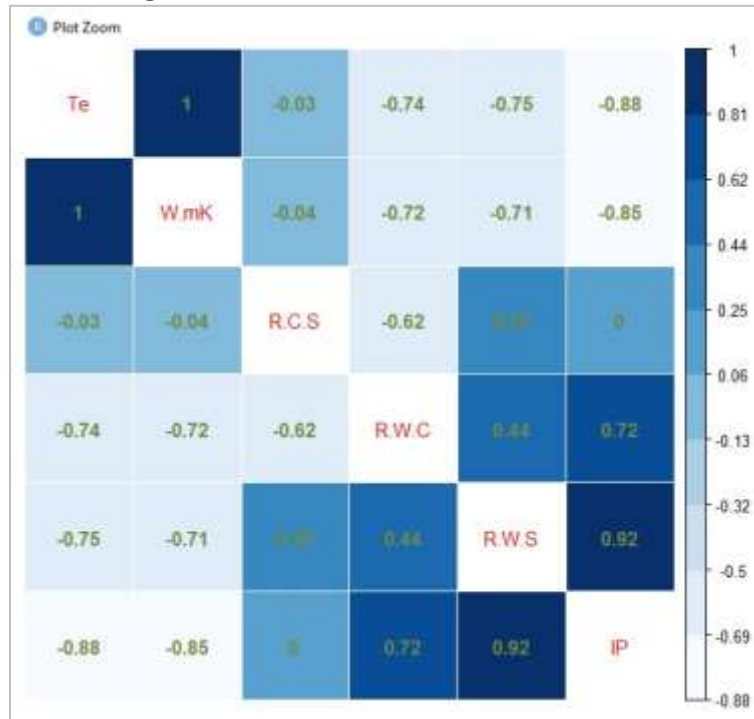
- **Conductividad térmica y temperatura exotérmica:** A mayor conductividad térmica, mayor es la temperatura liberada. Esto sugiere que las mezclas con mayor capacidad de conducción térmica facilitan la propagación del calor generado durante la hidratación del cemento.
- **Contenido de humedad y temperatura exotérmica:** A mayor contenido de humedad, menor es la temperatura liberada. Esto se debe a que el agua actúa como un amortiguador térmico, absorbiendo parte del calor de hidratación y reduciendo el pico de temperatura.
- **Índice de plasticidad y temperatura exotérmica:** A mayor índice de plasticidad, menor es la temperatura exotérmica. Esto indica que los suelos más cohesivos y con mayor actividad coloidal tienden a reducir la liberación de calor, posiblemente debido a su capacidad de retener agua y limitar la difusión del calor dentro de la mezcla.

Figura 69. Diagramas de cajas y bigotes de los datos obtenidos en función de la temperatura exotérmica.



Para determinar la influencia de cada variable en la temperatura exotérmica y evaluar la posible multicolinealidad, se construyó una matriz de correlación. En esta matriz se identificaron los siguientes criterios clave:

Figura 70. Matriz de multicolinealidad de las variables.



Los resultados obtenidos muestran una clara relación entre las variables involucradas en la evolución térmica de las mezclas de suelo cemento. Se identificó que la relación agua/cemento (RW/C) es directamente proporcional al índice de plasticidad (IP), lo que indica que a medida que aumenta la plasticidad del suelo, se requiere una mayor cantidad de agua en la mezcla. Sin embargo, esta relación es inversamente proporcional a la conductividad térmica y a la temperatura exotérmica (Te), lo que significa que mezclas con mayor contenido de agua presentan una menor capacidad de conducción térmica y generan menos calor durante la hidratación del cemento.

Por otro lado, el índice de plasticidad (IP) también mostró una correlación inversa con la temperatura exotérmica y la conductividad térmica de las mezclas, lo que sugiere que suelos con alta plasticidad tienen menor capacidad de conducción térmica y una menor liberación de calor en comparación con suelos más arenosos o de baja plasticidad.

Un hallazgo importante es que, contrario a la hipótesis inicial, el contenido de cemento no mostró una relación significativa con la temperatura liberada ni con la conductividad térmica. Esto implica que la cantidad de cemento en la mezcla no es el factor determinante en la generación de calor, sino

que otros factores, como la compactación, la humedad y la conductividad térmica del suelo, juegan un papel más relevante.

Sin embargo, se confirmó que la temperatura ambiente sí influye en la evolución térmica de las muestras, generando un efecto endotérmico. Es decir, las muestras de suelo cemento absorben calor del ambiente y tienden a adoptar la temperatura de curado de la cabina, lo que puede alterar la evolución térmica esperada de la reacción exotérmica del cemento.

Finalmente, se corroboró que la temperatura exotérmica es directamente proporcional a la conductividad térmica de la mezcla. Esto significa que materiales con mayor conductividad térmica disipan mejor el calor generado durante la hidratación del cemento, lo que podría influir en el tiempo de fraguado y en el desarrollo de resistencias.

3.3.6 Temperatura exotérmica en función de la Relación Agua Cemento

Para confirmar la correlación entre las variables que se identificaron en la matriz de multicolinealidad, se validaron tres modelos. Mod 1: Temperatura exotérmica en función de la relación agua cemento, Mod 2: Temperatura exotérmica en función de la conductividad térmica y Mod 3: Temperatura exotérmica en función del índice de plasticidad. Obteniendo los siguientes resultados:

Código R Studio 6

```
lm(formula = Te ~ R.W.C - 1, data = datos)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-26.42 -10.31  10.15  33.29  39.57

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
R.W.C       9.216      2.311    3.988  0.00402 **
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 25.96 on 8 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.6654,    Adjusted R-squared:  0.6235 
F-statistic: 15.91 on 1 and 8 DF,  p-value: 0.004015
```

Ecuación 11. $Te \sim R W/C$

$$Te = 9.216 \frac{W}{C} - 1$$

Según el modelo anterior, la relación agua cemento si afecta significativamente la temperatura exotérmica, el P-value es 0.004 y la confiabilidad del modelo es del 62%. Para revisar si es válido estadísticamente se validaron los supuestos, dando cifras significativas para todos.

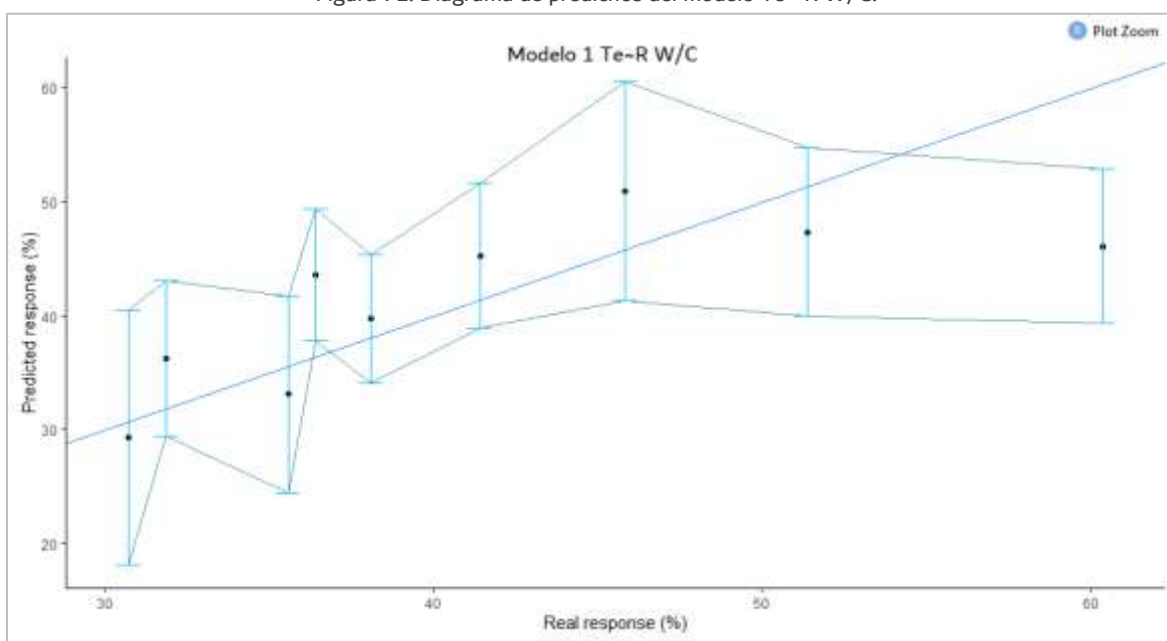
Tabla 21. Validación de supuestos para el Modelo $Te \sim R W/C$.

Supuesto	Coefficiente	P-value	Hipótesis
Independencia	1.0458	0.1197	Si cumple
Homocedasticidad	0.12085	0.9656	Si cumple

Supuesto	Coefficiente	P-value	Hipótesis
No Autocorrelación	1.0458	0.05987	Si cumple
Independencia de los Residuos	1.0458	0.1197	Si cumple
Normalidad	0.9386	0.5672	Si cumple

Con la validación de los supuestos se realiza el diagrama de predichos con los valores reales, si bien se conoce que el modelo es estadísticamente válido, es necesario tener en cuenta que el R^2 es bajo y que el valor de los datos es poco, por lo que se recomienda realizar más pruebas de laboratorio que validen el modelo.

Figura 71. Diagrama de predichos del modelo $Te \sim R W/C$.



3.3.7 Temperatura exotérmica en función de la conductividad térmica

Como se registró en matriz de la Figura 70, la otra variable que indicó multicolinealidad con la temperatura exotérmica fue la conductividad térmica. Por esta razón se validó un segundo modelo lineal, esta vez en función de la conductividad térmica cuyos resultados se muestran a continuación:

Código R Studio 7

```
lm(formula = Te ~ w.mK, data = datos)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.83427 -0.37870 -0.28334  0.04647  1.48763

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   9.2176    0.9944   9.27 3.52e-05 ***
w.mK         29.6801    0.8847  33.55 5.42e-09 ***
---

```

signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.8151 on 7 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.9938, Adjusted R-squared: 0.9929
F-statistic: 1125 on 1 and 7 DF, p-value: 5.418e-09

Ecuación 12. $T_e \sim C_T$

$$T_e = 9.2176 + 29.6801C_T$$

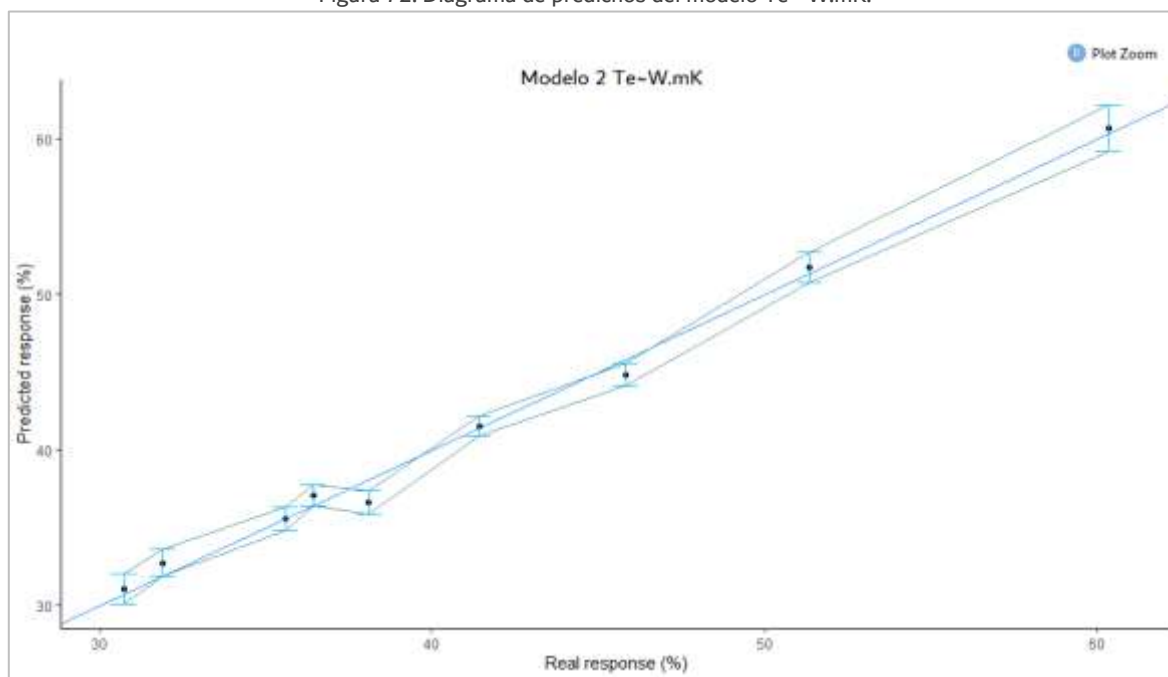
Donde, T_e es el área bajo la curva del incremento de temperatura medido durante las 32 primeras horas y C_T es la conductividad térmica en W.mK. Este modelo a diferencia del anterior registró un P-value muy bajo y una confiabilidad el 99%. El modelo confirma que la conductividad térmica tiene una estrecha relación con el área bajo la curva tomada del monitoreo de temperaturas. Del mismo modo, se validaron los supuestos del modelo que se ven en la Tabla 22.

Tabla 22. Validación de supuestos del modelo $T_e \sim W.mK$.

Supuesto	Coefficiente	P-value	Hipótesis
Independencia	1.9424	0.642	Si cumple
Especificación	0.75138	0.518	Si cumple
No Autocorrelación	1.9424	0.321	Si cumple
Independencia de los Residuos	0.0045608	0.946	Si cumple
Normalidad	0.86126	0.099	Si cumple

De otro lado, el diagrama de predichos con medidas reales se tiene una desviación estándar muy estrecha, por lo que este modelo es significativa y estadísticamente viable.

Figura 72. Diagrama de predichos del modelo $T_e \sim W.mK$.



3.3.8 Temperatura exotérmica en función del índice de plasticidad

El tercer y último modelo correlaciona la temperatura exotérmica con el índice de plasticidad. En este caso, se registró que los coeficientes tienen efectos significativos en la variable respuesta. Del mismo modo se observa que la confiabilidad es del 77% y el p-value es de 0.00182.

Código R Studio 8

```
lm(formula = Te ~ IP, data = datos)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-5.5010 -2.7974  0.0295  0.5179  9.0289

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   51.341     2.641   19.439 2.38e-07 ***
IP            -29.812     6.125   -4.867  0.00182 **
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 4.951 on 7 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.7719,    Adjusted R-squared:  0.7393
F-statistic: 23.69 on 1 and 7 DF, p-value: 0.00182
```

Ecuación 13. $Te \sim IP$

$$Te = 51.341 - 29.812IP$$

Donde Te , es la temperatura exotérmica calculada del área bajo la curva de monitoreos de temperaturas durante las primeras 32 horas y el IP es el índice de plasticidad de las muestras.

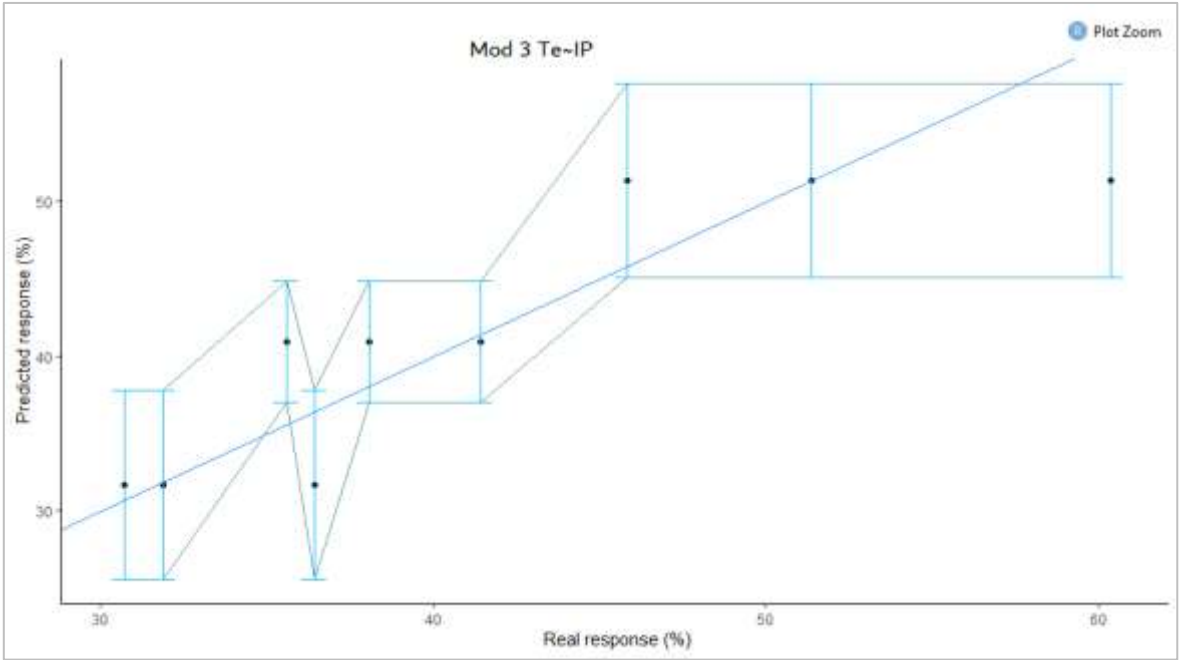
Del mismo modo, se validaron los supuestos del modelo registrando valores significativos para no rechazar la hipótesis nula. Es decir, que el modelo es válido estadísticamente.

Tabla 23. Validación de supuestos del modelo $Te \sim IP$.

Supuesto	Coficiente	P-value	Hipótesis
Independencia	1.5905	0.339	Si cumple
Especificación	0.50447	0.632	Si cumple
No Autocorrelación	1.5905	0.170	Si cumple
Independencia de los Residuos	0.013919	0.906	Si cumple
Normalidad	0.92276	0.416	Si cumple

Para finalizar, el diagrama de predichos con los datos reales de la Figura 73 muestra un buen desempeño del modelo, si bien las desviaciones son amplias, existe claridad entre los valores registrados y los valores calculados con el modelo.

Figura 73. Diagrama de predichos del modelo Te~ IP.



3.4 EFECTO DE LA TEMPERATURA DE CURADO EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA Y LA TRACCIÓN INDIRECTA

3.4.1 Monitoreo de temperatura de curado

El ensayo se diseñó con el objetivo de evaluar el impacto de la temperatura de curado en la resistencia mecánica y el comportamiento resiliente de las mezclas de suelo cemento. Para ello, se acondicionaron tres cuartos húmedos con temperaturas controladas de 40°C, 10°C y 28°C, garantizando una humedad relativa constante mediante el uso de humidificadores y un termohigrómetro para el monitoreo y ajuste preciso de las condiciones ambientales.

Las muestras fueron protegidas contra goteos y pérdida de humedad mediante una envoltura de tela absorbente y una capa de papel vinilo. Durante 7 días continuos, las muestras permanecieron en sus respectivas cabinas de curado. Una vez finalizado este período, fueron retiradas y dejadas en reposo por 2 horas a temperatura ambiente antes de proceder con las mediciones.

Para caracterizar su comportamiento mecánico, se registraron la masa, el diámetro y la altura de cada muestra en tres puntos distintos, asegurando una evaluación precisa de posibles cambios volumétricos. Posteriormente, se realizaron ensayos de compresión uniaxial, tracción indirecta y cargas triaxiales cíclicas, con el propósito de determinar la influencia de la temperatura de curado en la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción y el módulo resiliente de las mezclas.

Los resultados de estas pruebas permitirán analizar la relación entre la temperatura de curado y el desarrollo de resistencia en las mezclas de suelo cemento, proporcionando información clave para la optimización del diseño y desempeño de estas en aplicaciones de infraestructura.

Figura 74. Almacenamiento de muestras en cabinas de curado.



El diseño experimental incluyó 9 mezclas diferentes, con 3 réplicas por cada una, sumando un total de 27 muestras cilíndricas destinadas a ensayos de tracción indirecta, 27 muestras para compresión simple y 27 muestras para evaluar módulos resilientes. Todas las mezclas fueron fabricadas con un contenido de cemento R C/S de 0.16. Sin embargo, dado que cada material presenta un contenido de humedad óptimo distinto, se establecieron tres relaciones A/C (agua/cemento) distintas, calculadas a partir de los modelos de predicción descritos en la Tabla 19.

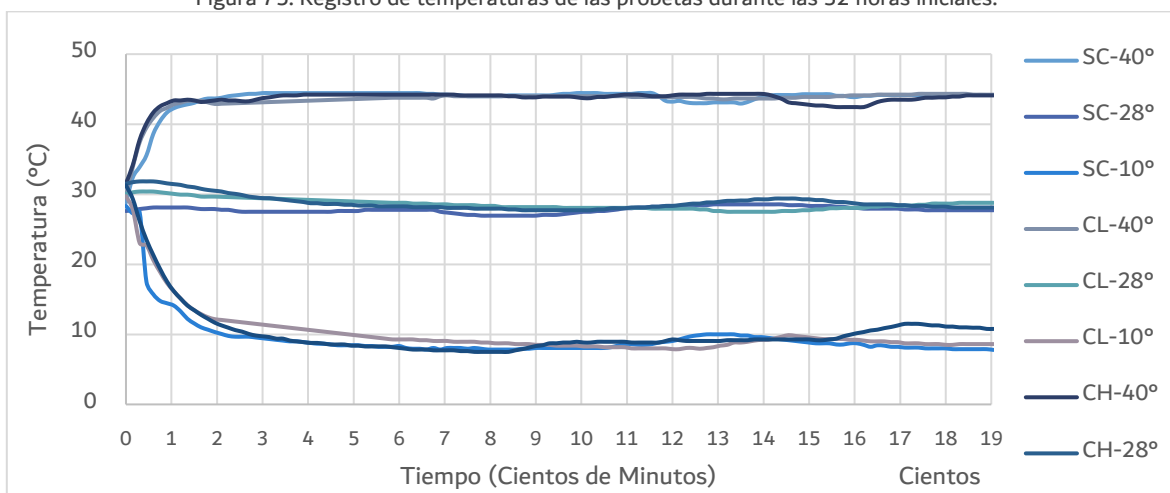
Para monitorear la evolución térmica de las mezclas, se fabricaron nueve probetas testigo, que se colocaron en las cabinas junto con las muestras de resistencia. Estas probetas fueron perforadas con una broca de 2 mm de diámetro e insertadas con pajillas plásticas para facilitar la colocación de termocuplas. Se registró la temperatura interna de los testigos durante las primeras 32 horas, permitiendo calcular el área bajo la curva de temperatura en cada una de las 9 mezclas, y correlacionarla con la resistencia medida en MPa.

Durante el proceso de curado, la alta humedad relativa de las cabinas facilitó la hidratación gradual de las mezclas, pero también generó deformaciones por exceso de humedad, especialmente en las mezclas CH (arcillas de alta plasticidad), debido a su alto contenido de materia orgánica y alta absorción de agua. Para minimizar la variabilidad en los resultados, se modificó el proceso de almacenamiento: las muestras fueron envueltas con una capa sencilla de papel plástico autoadhesivo tipo vinilo (vinipel), lo que permitió un control más efectivo de la humedad sin comprometer la hidratación.

Tabla 24. Área bajo la curva de la temperatura monitoreada.

SC-40°	SC-28°	SC-10°	CL-40°	CL-28°	CL-10°	CH-40°	CH-28°	CH-10°
837.18	533.90	181.28	834.62	548.63	195.32	836.08	553.52	197.04

Figura 75. Registro de temperaturas de las probetas durante las 32 horas iniciales.

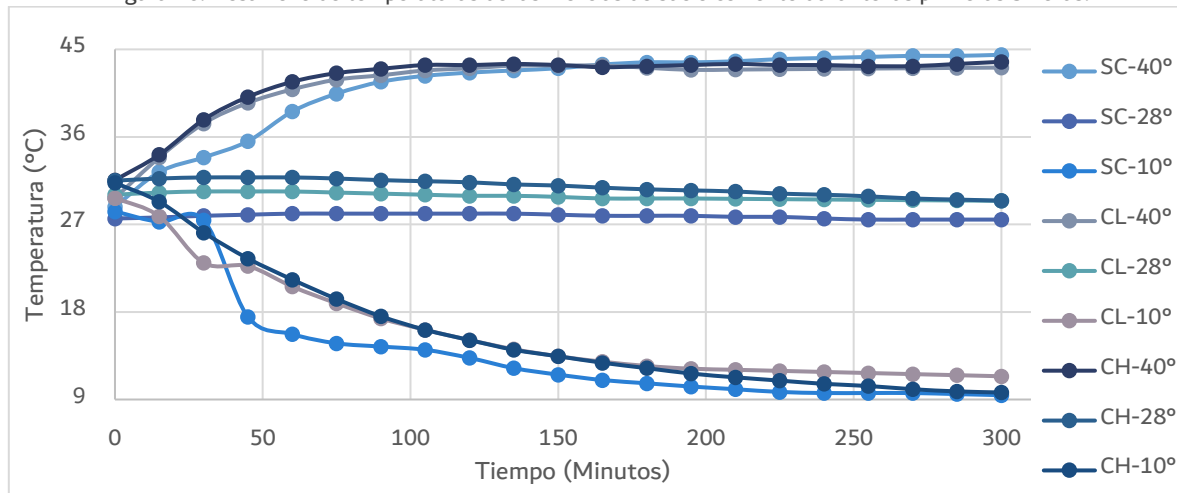


Como se observa en la

Figura 75, la reacción exotérmica del cemento en las mezclas no generó temperaturas de la misma manera que en un medio semiadiabático, como se mostró previamente en la Figura 67. En este caso, la temperatura externa influye directamente en la temperatura de la muestra. Las mezclas curadas a 10°C registraron temperaturas muy cercanas a este valor, mientras que las mezclas curadas a 40°C alcanzaron temperaturas superiores a los 45°C. Por otro lado, las muestras curadas a 28°C mostraron la variabilidad térmica habitual descrita en la Figura 68.

El proceso de liberación de calor se divide en dos fases principales. La primera ocurre en la fase inicial, desde el tiempo 0 hasta los primeros 600 minutos. Durante estas primeras cinco horas, el material transfiere la temperatura externa hacia el interior de la mezcla, afectando la temperatura liberada por la reacción exotérmica del cemento durante su hidratación, como se evidencia en la Figura 76.

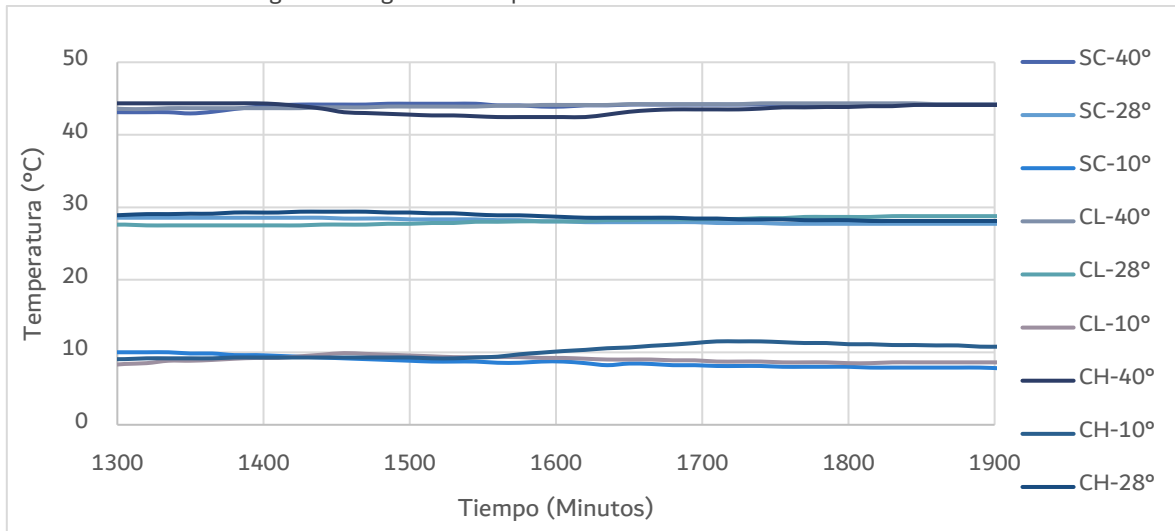
Figura 76. Desarrollo de temperaturas de las mezclas de suelo cemento durante las primeras 5 horas.



El segundo incremento de temperatura se produce entre los 1300 y 1700 minutos (aproximadamente entre 21 y 28 horas). Este comportamiento es característico de mezclas secas, donde la hidratación del cemento ocurre en un periodo más prolongado en comparación con las mezclas más fluidas.

Este retraso en la liberación de calor sugiere que la resistencia del material no solo depende de la reacción exotérmica del cemento, sino también de otras variables intervinientes, como la densidad de la mezcla, el contenido de humedad y la conductividad térmica. Estos factores juegan un papel crucial en la evolución de las propiedades mecánicas de la mezcla a lo largo del tiempo.

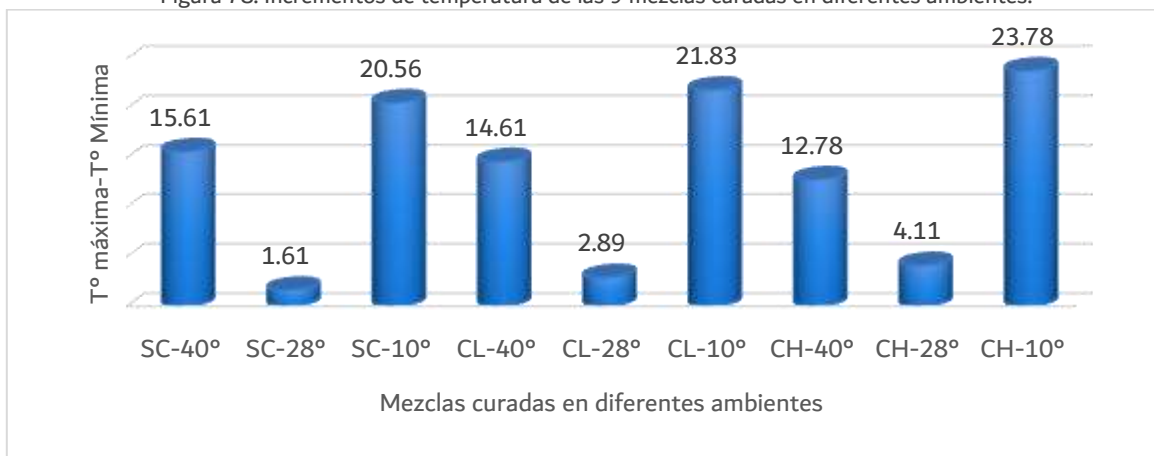
Figura 77. Registro de temperaturas desde la hora 21 hasta la hora 29.



El incremento de la temperatura (ΔT) en mezclas con cemento hidráulico es una referencia válida en normativas técnicas para predecir el comportamiento mecánico del concreto a partir de ensayos de calorimetría y monitoreo de temperaturas. Sin embargo, en este estudio, la temperatura externa de curado tuvo un impacto significativo en ΔT . Se observó que el mayor incremento de temperatura ocurrió en las muestras curadas a **10°C**, seguido por las curadas a **40°C**, mientras que el menor incremento se registró en las muestras expuestas a **28°C**, como se muestra en la Figura 78.

Estos resultados indican que los materiales absorben y conducen la temperatura externa, alterando el ΔT y afectando la liberación de calor por hidratación del cemento. Por esta razón, en el análisis de datos se toma como referencia el área bajo la curva de las primeras 32 horas de monitoreo, ya que representa de manera más precisa el comportamiento térmico de las mezclas en diferentes condiciones de curado.

Figura 78. Incrementos de temperatura de las 9 mezclas curadas en diferentes ambientes.



3.4.2 Efecto de la temperatura en la composición química

Se utilizaron técnicas de difracción de rayos X (DRX) para analizar la composición química y los porcentajes de fases en las mezclas con cemento hidráulico, comparándolos con muestras sin cemento. A través del análisis discriminante, correlación canónica y modelos jerárquicos, se contrastaron los resultados con bases de datos previamente validadas.

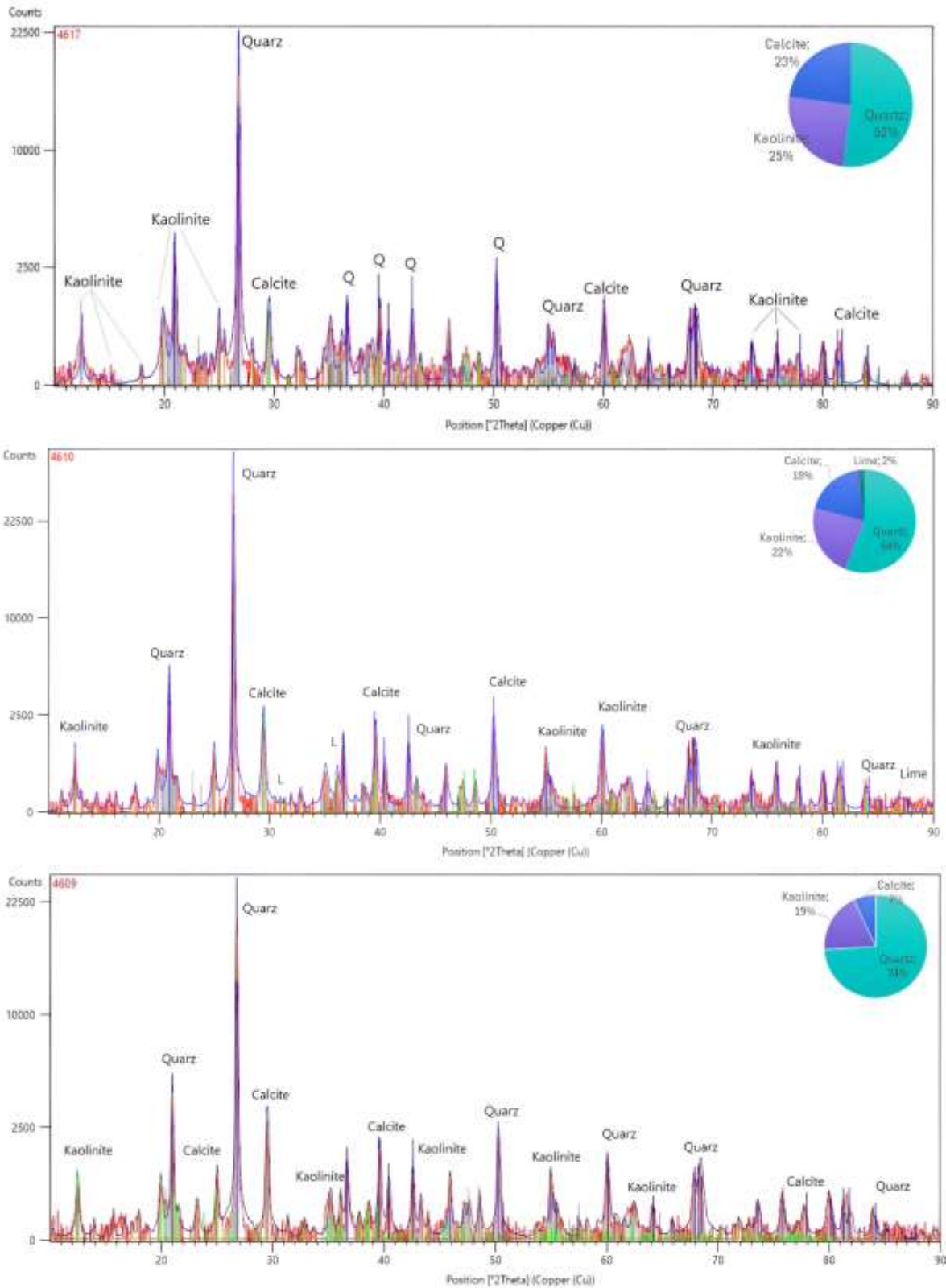
Los gráficos obtenidos destacan picos característicos de cuarzo (Q), caolinita (K) y componentes del cemento hidráulico como CSH (silicatos de calcio hidratados), calcita ($\text{Ca}_6\text{C}_6\text{O}_{18}$) y cal (Ca_4O_4). Se observó que, en comparación con las muestras sin cemento, la reacción química entre el cemento hidráulico y el caolín da lugar a la formación de gel CSH, compuesto fundamental para el desarrollo de la resistencia mecánica.

Un hallazgo clave fue que la cantidad de CSH es inversamente proporcional al contenido de materia orgánica. Esto sugiere que los suelos con altos niveles de material orgánico pueden interferir en la hidratación del cemento y afectar la formación de los productos de reacción, lo que impacta negativamente la resistencia final del suelo-cemento.

Tabla 25. Semi cuantificación por difracción de Rayos X – Cualitativo de las mezclas de residuos con cemento hidráulico.

Muestra	Quartz	Kaolinite	Calcite	Lime
	Si_6O_6	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_9\text{H}_4$	$\text{Ca}_6\text{C}_6\text{O}_{18}$	Ca_4O_4
SC	81%	19%		
SC_C	74%	19%	7%	
CL	62%	38%		
CL_C	57%	23%	18%	2%
CH	54%	46%		
CH_C	52%	25%	23%	

Figura 79. Diagramas de XRD para las tres mezclas SC (4609), CL (4610) y CH (4617)

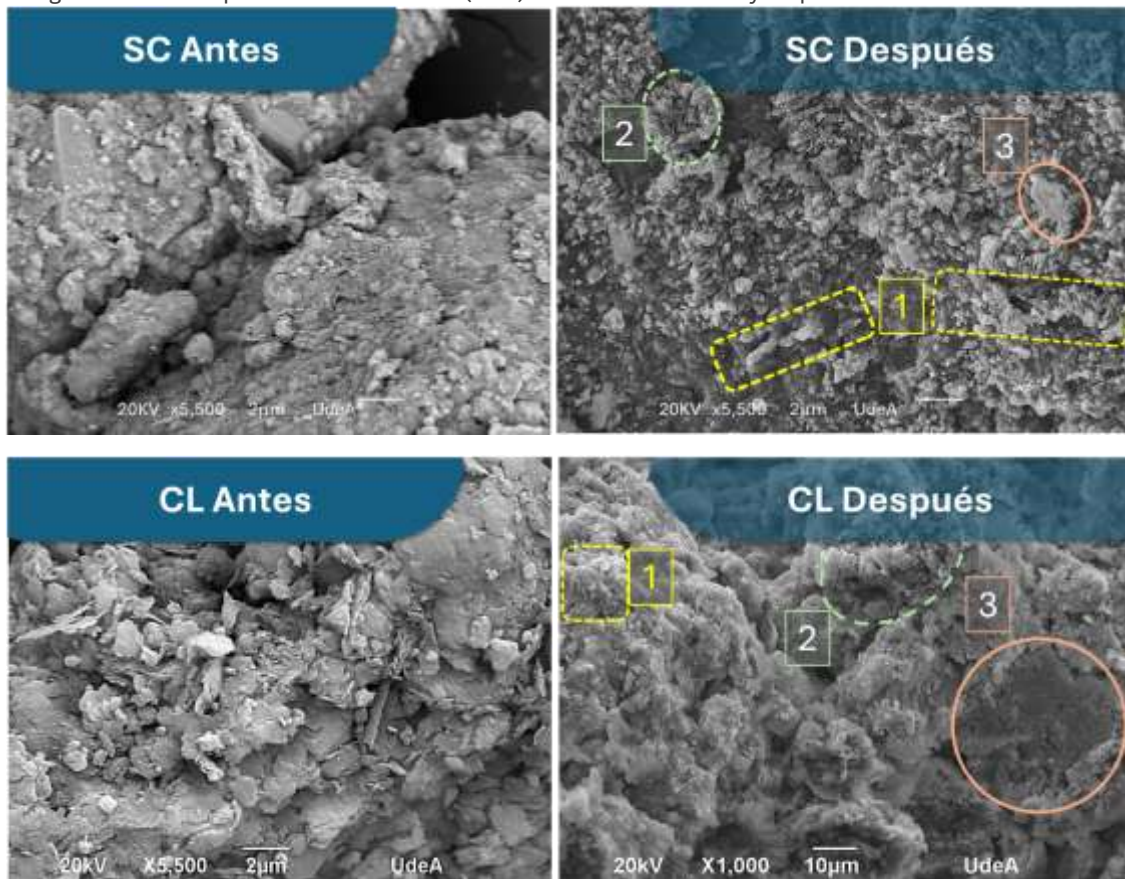


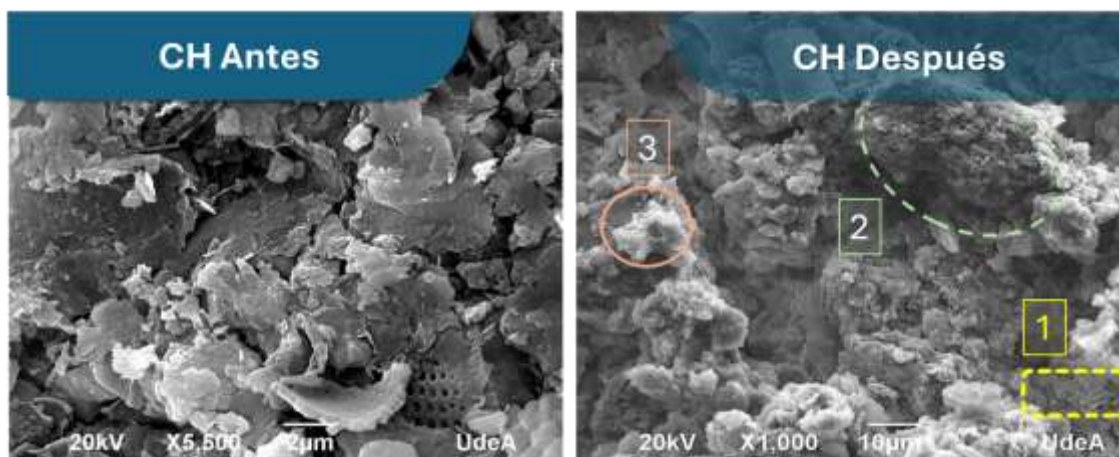
Los diagramas de la Figura 79 muestran diferencias en la composición química de las mezclas de suelo-cemento según el tipo de suelo utilizado. La mezcla con arena arcillosa presentó un menor contenido de calcita (carbonato de calcio, CaCO_3) en comparación con las mezclas de arcilla de media y alta compresibilidad, las cuales registraron una mayor proporción de este compuesto.

Las micrografías SEM evidencian la transformación mineralógica tras la reacción con el cemento hidráulico. Antes de la hidratación, la estructura de la arcilla caolinita se presenta en forma de láminas laminadas. Sin embargo, tras el proceso de maduración, estas láminas aparecen recubiertas y aglomeradas por una matriz de calcita, lo que indica que el carbonato de calcio desempeña un papel clave en la estabilización del material y en la cohesión de la mezcla.

la mezcla con arena arcilla registró un menor contenido de calcita, mientras que la muestra de arcilla de alta compresibilidad y media compresibilidad registró un mayor contenido. En las micrografías SEM se observa la transformación del mineral arcilloso. Antes de la mezcla con cemento hidráulico, se observa la estructura de la arcilla caolinita, en láminas. Y luego de la mezcla, al cabo de su edad de maduración, las láminas se encuentran recubiertas y aglomeradas por la calcita o carbonato de calcio.

Figura 80. Microscopía electrónica de barrio (SEM) de las muestras antes y después de mezclarlas con cemento





El análisis de espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF) permitió determinar la composición química de las mezclas de residuos con cemento hidráulico. Como se muestra en la Tabla 26, la arena arcillosa presentó un menor contenido de óxido de calcio (CaO) en comparación con las muestras de arcilla de media y alta compresibilidad, siendo esta última la que registró el mayor contenido de CaO.

Tabla 26. Composición química por espectrometría de Fluorescencia XRD

Mezcla	CaCO ₃ (%)	SiO ₂ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Si (%)	K (%)	Ca (%)	Fe (%)
SC_C	17.2	45.7	0	3.87	10.74	0.64	18.55	3.29
CL_C	18.49	41.84	0	6.09	18.93	0.8	8.55	5.31
CH_C	21.03	46.4	0.46	5.93	18.41	0.59	5.67	1.53

Este resultado es consistente con los análisis previos de difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (SEM), donde se evidenció una mayor formación de carbonato de calcio (CaCO₃) en las arcillas con mayor plasticidad. La reacción entre el cemento hidráulico y los minerales arcillosos facilita la formación de compuestos cementantes como los geles CSH (silicatos de calcio hidratados), los cuales contribuyen a la mejora de las propiedades mecánicas y térmicas de las mezclas.

3.4.3 Efecto de la temperatura de curado en resistencia a la tracción indirecta

Para validar la relación entre las variables en las 27 muestras falladas a tracción indirecta, se emplearon dos métodos de análisis: diagrama de cajas y bigotes (ver Figura 81) y matriz de multicolinealidad (ver Figura 82).

El análisis gráfico mostró que los resultados del ensayo presentan una distribución leptocúrtica con un ligero sesgo hacia la izquierda en las resistencias a la tracción indirecta. Para garantizar el cumplimiento del supuesto de normalidad, se realizó una transformación de las variables clave:

- **Relación agua/cemento (A/C)**, considerando que es un valor adimensional.
- **Temperatura (T)**, en grados centígrados.
- **Índice de plasticidad (IP)**, expresado en porcentaje.

En la Tabla 27 se presentan las transformaciones realizadas para cada variable, asegurando que los datos cumplan con los criterios estadísticos necesarios para el análisis de correlaciones y la posterior modelación de las resistencias.

Tabla 27. Variables transformadas para el modelo lineal de tracción indirecta

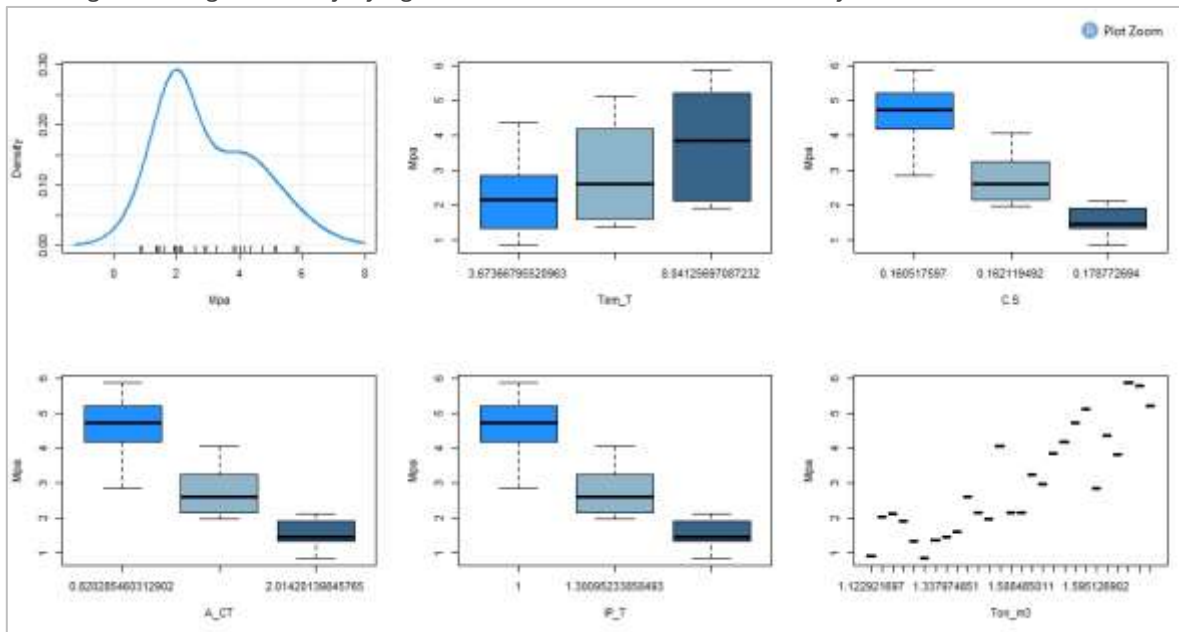
Variable	Unidad	Nombre	Transformación
Temperatura	°C	Tem_T	$Tem^{0.5650999}$
Índice de plasticidad	%	IP_T	$(IP+1)^{0.8766829}$
Relación Agua/Cemento	gr/gr	A_CT	$A_C^{0.6602242}$

Las variables transformadas presentan una proporcionalidad indirecta con la resistencia a la tracción indirecta en MPa. Es decir, a medida que la relación agua/cemento (A/C), la temperatura (T) y el índice de plasticidad (IP) aumentan, la resistencia tiende a disminuir.

Por otro lado, la densidad o peso unitario muestra una tendencia creciente en función de la resistencia, lo que indica que mezclas más densas tienden a desarrollar una mayor resistencia a la tracción indirecta.

Respecto a la temperatura de curado, aunque su efecto sobre la resistencia sigue una trayectoria creciente, este comportamiento está más influenciado por el tipo de suelo que por el conjunto de datos en general. Esto sugiere que la composición mineralógica y las características intrínsecas de cada tipo de suelo juegan un papel clave en la evolución de la resistencia mecánica.

Figura 81. Diagramas de cajas y bigotes de la resistencia a la tracción indirecta y las variables intervinientes.



La matriz de multicolinealidad revela una correlación moderada (0.42) entre la temperatura de curado y la resistencia a la tracción indirecta, lo que sugiere que un aumento en la temperatura de curado podría contribuir al desarrollo de la resistencia.

Además, se confirma una correlación positiva entre la resistencia a la tracción indirecta y la densidad seca de la muestra, lo que indica que una mayor densidad favorece una mejor resistencia.

Por otro lado, el contenido de cemento (CS), la relación agua/cemento transformada (A/CT) y el índice de plasticidad transformado (IP_T) presentan una correlación negativa con la resistencia a la tracción indirecta, evidenciando una relación inversamente proporcional. Esto sugiere que un mayor contenido de agua y una mayor plasticidad del suelo pueden afectar negativamente la resistencia, posiblemente debido a una mayor porosidad y menor compactación efectiva de la mezcla.

Figura 82. Matriz de multicolinealidad de la resistencia a la tracción indirecta y las variables intervinientes.



Dado que la correlación entre la resistencia a la tracción indirecta (MPa) y la temperatura de curado transformada (Tem_T) es de 0.42, este valor es suficiente para validar un modelo estadístico entre ambas variables.

El análisis permitió establecer un modelo lineal de dos factores, que se expresa de la siguiente manera:

Ecuación 14. Tracción indirecta en función de la temperatura de curado.

$$\sigma_T = 4.1170 + 0.3438T^{0.5650999} - 3.1227\left(\frac{A}{C}\right)^{0.6602242} + 1.0547(IP + 1)^{0.8766829}$$

El modelo tiene un coeficiente de determinación $R^2 = 0.9249$, lo que indica una alta capacidad explicativa de las variables predictoras sobre la resistencia.

El p-value = $1.106e-13$ confirma que tanto la temperatura de curado como la relación agua/cemento afectan significativamente la resistencia a la tracción indirecta, validando la solidez del modelo.

Código R Studio 9

```
lm(formula = Mpa ~ Tem_T + A_CT + IP_T, data = Continuas)
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-1.01270 -0.20343 -0.00499  0.25983  0.61971
Coefficients:
(Intercept) Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
Tem_T       0.3438   0.0444    7.742 7.49e-08 ***
A_CT       -3.1227   3.1438   -0.993  0.331
IP_T        1.0547   6.7337    0.157  0.877
---
```

signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.4128 on 23 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.9335, Adjusted R-squared: 0.9249
F-statistic: 107.7 on 3 and 23 DF, p-value: 1.106e-13

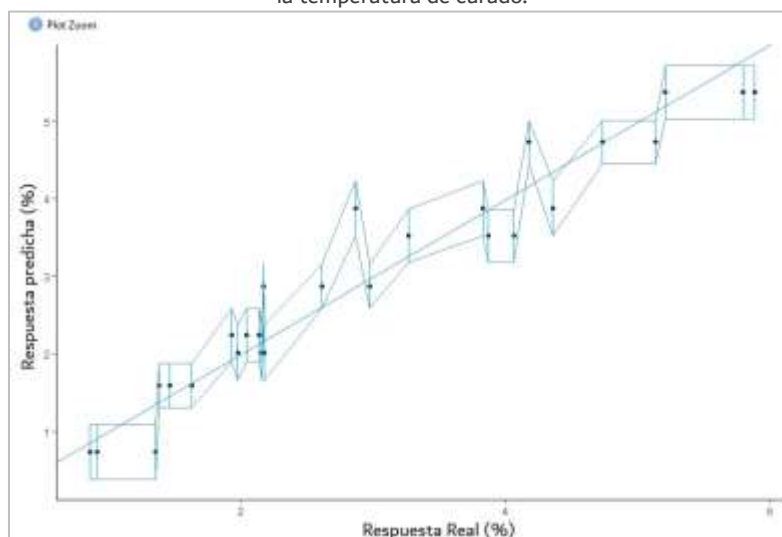
El modelo fue validado estadísticamente tras comprobar el cumplimiento de los supuestos fundamentales: independencia, no autocorrelación, especificación, homocedasticidad y normalidad. Estos resultados, presentados en la tabla siguiente, confirman que el modelo es estadísticamente sólido y confiable para predecir la resistencia a la tracción indirecta en función de la temperatura de curado y la relación agua/cemento transformada, como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 28. Validación de supuestos del modelo que relaciona la tracción indirecta con la temperatura de curado

Supuesto	Coefficiente	P-value	Hipótesis
Independencia	2.3	0.8148	No se rechaza
No Autocorrelación	2.2848	0.6563	No se rechaza
Especificación	2.8391	0.08103	No se rechaza
Homocedasticidad	1.3231	0.3422	No se rechaza
Normalidad	0.96145	0.3985	No se rechaza

La gráfica de la Figura 83 muestra la relación entre los resultados reales obtenidos en los ensayos de resistencia a la tracción indirecta y los valores calculados con el modelo estadístico. Con un 92.5% de confiabilidad, se observa una alineación significativa entre ambos conjuntos de datos, lo que valida la precisión del modelo.

Figura 83. Diagrama de resultados reales con resultados calculados de la resistencia a la tracción indirecta en función de la temperatura de curado.



3.4.4 Efecto de la temperatura de curado en la resistencia a la compresión

Se aplicaron transformaciones a las variables para evaluar su influencia en la resistencia a la compresión inconfiada. Los resultados muestran una correlación positiva entre la resistencia y la temperatura de curado (Tem_T), el índice de plasticidad (IP_T) y la densidad seca. En contraste, la relación agua/cemento transformada (A_CT) presenta una correlación inversa con la resistencia, lo que indica que un mayor contenido de agua en la mezcla reduce su capacidad de soportar carga.

Por la naturaleza del experimento el contenido de cemento no mostró una correlación significativa con la resistencia, lo que sugiere que otros factores como la compactación, la humedad y la temperatura de curado tienen un papel más determinante en el desarrollo de la resistencia del suelo cemento. Estos hallazgos refuerzan la importancia de controlar cuidadosamente la relación agua/cemento y las condiciones de curado para optimizar la resistencia mecánica de las mezclas.

Tabla 29. Variables transformadas en el modelo lineal

Variable	Unidad	Nombre	Transformación
Temperatura	°C	Tem_T	$Tem^{0.865101}$
Resistencia a la compresión inconfiada	MPa	Mpa_T	$Mpa^{-0.2258258}$
Índice de plasticidad	%	IP_T	$(IP+1)^{0.8842303}$
Relación Agua/Cemento	gr/gr	A_CT	$A_C^{0.4315158}$

La transformación matemática aplicada al índice de plasticidad generó una relación aparentemente proporcional con la resistencia a la compresión. Sin embargo, este efecto es una distorsión causada por la transformación de los datos. En realidad, la tendencia esperada es inversa: a mayor índice de plasticidad, menor es la resistencia a la compresión.

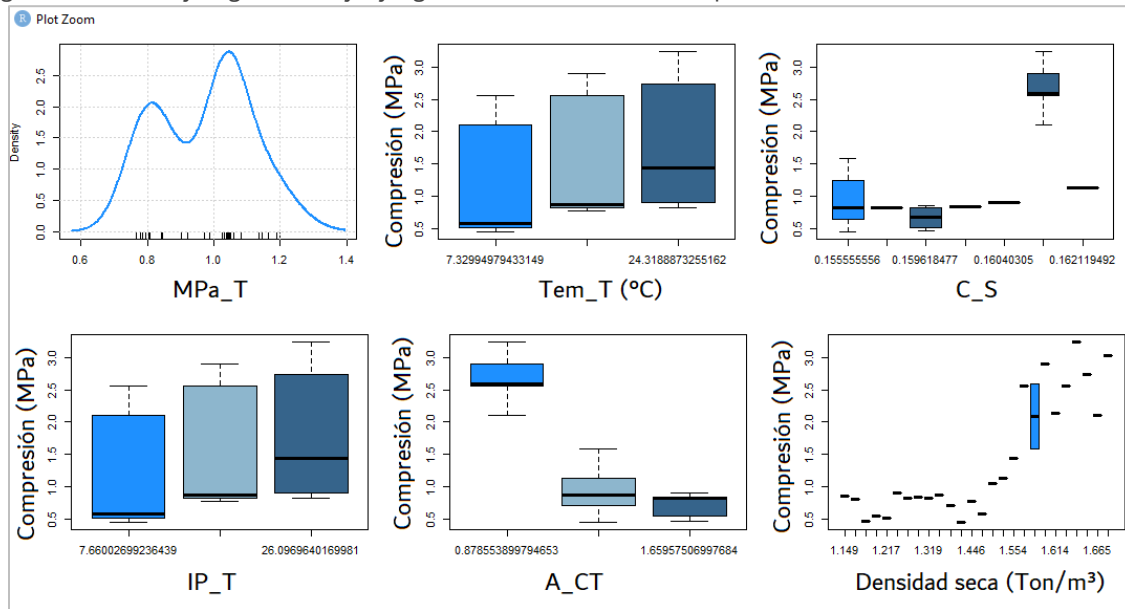
Esto se debe a que los suelos con mayor plasticidad contienen más arcillas expansivas, lo que aumenta su capacidad de retención de agua y reduce su compactabilidad. Como resultado, estas mezclas tienden a desarrollar estructuras internas menos densas y resistentes. Por lo tanto, aunque el modelo transformado muestra una relación positiva, el comportamiento físico del material sugiere que la plasticidad elevada disminuye la resistencia del suelo cemento.

La matriz de multicolinealidad con las variables originales, presentada en la Por otro lado, la resistencia a la compresión es directamente proporcional a la temperatura de curado, la densidad seca y el contenido de cemento. Esto sugiere que temperaturas de curado más altas favorecen el desarrollo de la resistencia, mientras que una mayor compactación y un contenido óptimo de cemento mejoran la cohesión de la mezcla, promoviendo un mejor desempeño mecánico.

Estos resultados refuerzan la importancia de controlar la proporción agua/cemento y la temperatura de curado para optimizar la resistencia de las mezclas de suelo cemento, especialmente en aplicaciones donde se requiere estabilidad estructural a largo plazo.

Figura 85, confirma que la resistencia a la compresión inconfiada sigue patrones esperados en función de las propiedades del material. Se observa que la resistencia es inversamente proporcional al índice de plasticidad y a la relación agua/cemento, lo que indica que suelos con mayor plasticidad o mezclas con un alto contenido de agua tienden a desarrollar menor resistencia.

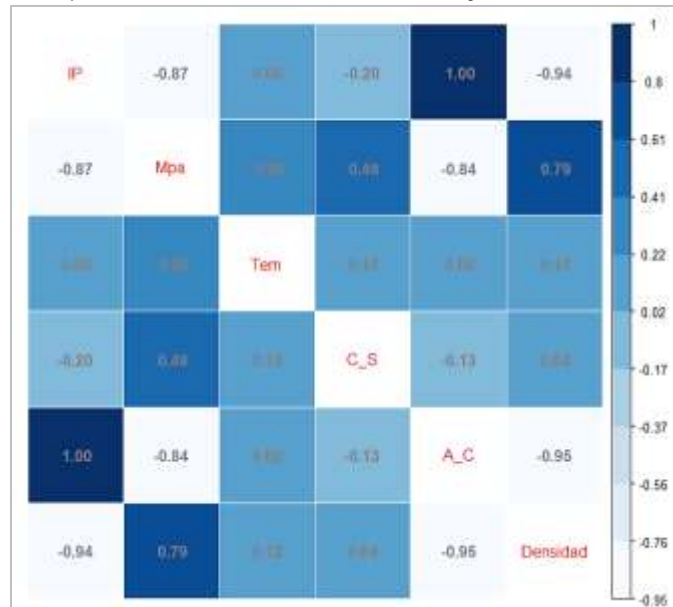
Figura 84. Densidad y diagrama de cajas y bigotes de la resistencia a la compresión en función con las demás variables.



Por otro lado, la resistencia a la compresión es directamente proporcional a la temperatura de curado, la densidad seca y el contenido de cemento. Esto sugiere que temperaturas de curado más altas favorecen el desarrollo de la resistencia, mientras que una mayor compactación y un contenido óptimo de cemento mejoran la cohesión de la mezcla, promoviendo un mejor desempeño mecánico.

Estos resultados refuerzan la importancia de controlar la proporción agua/cemento y la temperatura de curado para optimizar la resistencia de las mezclas de suelo cemento, especialmente en aplicaciones donde se requiere estabilidad estructural a largo plazo.

Figura 85. Matriz de multicolinealidad de la resistencia a compresión (Mpa), Temperatura de curado (Tem), Relación agua/cemento (A_C), Índice de plasticidad (IP), densidad seca (Ton/m³) y contenido de cemento (C_S).



Para construir el modelo de predicción de la resistencia a la compresión inconfiada, fue necesario transformar las variables debido a la falta de normalidad en su distribución. Tras la transformación, se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2=0.8648$, lo que indica que el modelo explica el 86.48% de la variabilidad en los datos.

Ecuación 15. Resistencia a la compresión en función de la temperatura de curado.

$$\sigma_c^{-0.2258258} = 0.68592 \frac{A}{C}^{0.4315158} - 0.195T^{0.865101} + 0.17269(IP + 1)^{0.8842303}$$

Donde σ_c es la resistencia a la compresión en MPa, A/C es la división entre la masa de agua en gramos y la masa de cemento en gramos, T es la temperatura de curado en grados centígrados y el IP es el índice de plasticidad en porcentaje.

Código R Studio 10

```
lm(formula = Mpa_T ~ A_CT + Tem_T^2 + IP_T, data = Continuas)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.089783	-0.033051	-0.005716	0.023748	0.143627

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	0.68592	0.14119	4.858	6.63e-05	***
A_CT	0.36350	0.03304	11.003	1.22e-10	***
Tem_T	-0.19500	0.47061	-0.414	0.0682	**
IP_T	0.17269	0.43384	0.398	0.0694	**

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

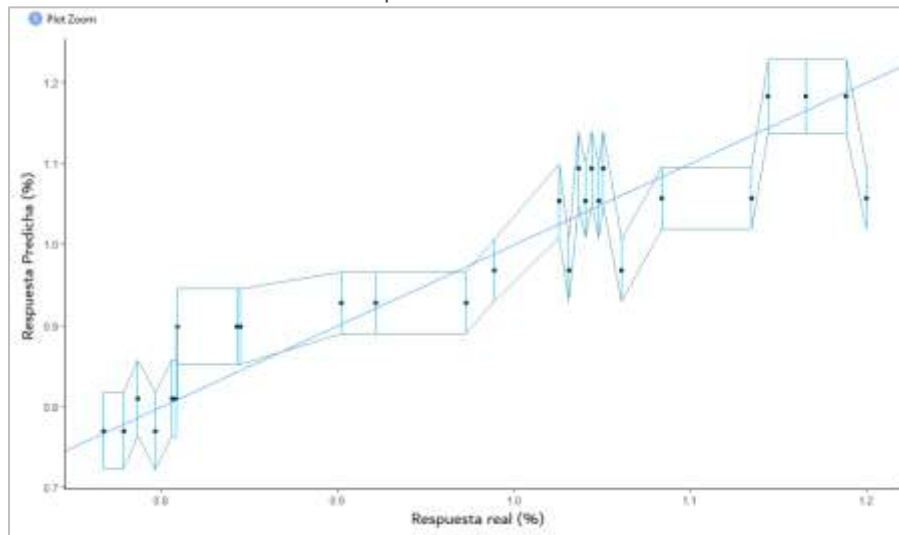
Residual standard error: 0.05485 on 23 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.8648, Adjusted R-squared: 0.8472
F-statistic: 49.05 on 3 and 23 DF, p-value: 3.74e-10

Tabla 30. Validación de supuestos Modelo de la Ecuación 15.

Supuesto	Coefficiente	P-value	Hipótesis
Independencia	1.4954	0.05202	No se rechaza
No Autocorrelación	1.7192	0.1898	No se rechaza
Especificación	1.2626	0.3035	No se rechaza
Homocedasticidad	1.9268	0.1691	No se rechaza
Normalidad	0.94527	0.1643	No se rechaza

Este resultado confirma que la temperatura de curado, la relación agua/cemento, la densidad seca y el índice de plasticidad tienen una influencia significativa en la resistencia de la mezcla. La transformación de variables permitió mejorar la estabilidad del modelo y garantizar que cumpliera con los supuestos estadísticos necesarios para su validez.

Figura 86. Diagrama de resultados reales con resultados calculados de la resistencia a la compresión en función de la temperatura de curado.



En resumen, se consolidan los datos de los modelos lineales realizados con los datos obtenidos de los experimentos de resistencia a la compresión inconfiada y tracción indirecta de la siguiente manera:

Ecuación 16. Resistencia a la tracción indirecta en función de la temperatura de curado, la relación agua cemento y el índice de plasticidad

$$\sigma_T = 4.1170 + 0.3438T^{0.5650999} - 3.1227\left(\frac{A}{C}\right)^{0.6602242} + 1.0547(IP + 1)^{0.8766829}$$

Ecuación 17. Resistencia a la compresión inconfiada en función de la temperatura de curado, la relación agua cemento y el índice de plasticidad.

$$\sigma_c^{-0.2258258} = 0.68592\frac{A}{C}^{0.4315158} - 0.195T^{0.865101} + 0.17269(IP + 1)^{0.8842303}$$

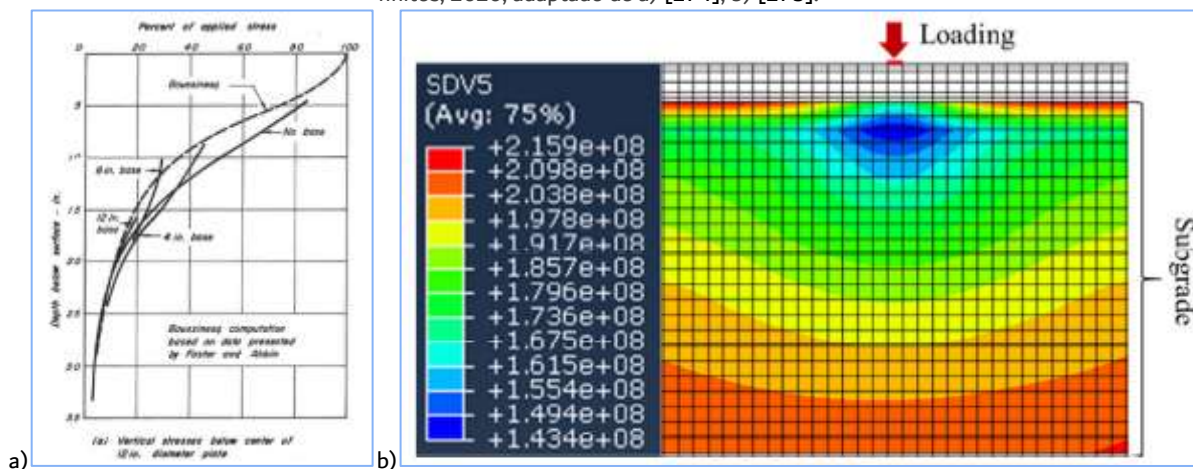
3.5 EFECTO DE LA TEMPERATURA DE CURADO EN EL MÓDULO RESILIENTE

3.5.1 Ensayo Módulo Resiliente de Suelos

El ensayo de Módulo Resiliente es un método regulado por las normas técnicas AASHTO T307 y adoptado en Colombia bajo la especificación E-156 de 2013 del Instituto Nacional de Vías. Su objetivo es medir la deformación total recuperable de un suelo sometido a un esfuerzo axial cíclico repetido, manteniendo una frecuencia constante y aplicando una presión de confinamiento triaxial. Este ensayo es fundamental para evaluar las propiedades elásticas de los materiales utilizados en la construcción de pavimentos.

La necesidad de caracterizar adecuadamente los materiales para pavimentos ha llevado al desarrollo de modelos de esfuerzo desde los estudios iniciales de Bussinesq (1885), quien propuso una expresión para estimar el incremento del esfuerzo en suelos debido a cargas puntuales. Posteriormente, Mac Mahon y Yoder (1961) identificaron que este incremento depende de la granulometría del suelo, lo que permitió a la División de Ingenieros de los Estados Unidos perfeccionar modelos de esfuerzos en pavimentos.

Figura 87. Incremento del esfuerzo vertical por (a) Bussinesq, Mac Mahon y Yoder, 1961, (b) Modelación de elementos finitos, 2020, adaptado de a) [274], b) [275].



En la actualidad, los avances tecnológicos han mejorado la capacidad para medir la transmisión de esfuerzos desde la superficie del pavimento hasta las capas subyacentes. Esto ha permitido definir parámetros de control más precisos y optimizar los diseños estructurales.

Las normas de ensayo establecen valores específicos para la carga cíclica, la presión de confinamiento y el número de ciclos aplicados, diferenciando entre tipos de materiales y su ubicación dentro de la estructura del pavimento. Estos parámetros aseguran que los valores obtenidos en laboratorio puedan ser utilizados en modelos de diseño que reflejen con precisión el comportamiento del material en condiciones reales de servicio.

El ensayo se llevó a cabo utilizando un sistema electroneumático GCTS, diseñado para realizar pruebas triaxiales en suelos no saturados o parcialmente saturados. Este equipo permite la automatización completa del procedimiento de ensayo, asegurando precisión en la medición y control de las variables involucradas.

El sistema está compuesto por una cámara de compresión triaxial, que permite la aplicación de esfuerzos confinantes al espécimen; un pistón de pulso cíclico, encargado de generar esfuerzos axiales repetidos; sensores de presión para monitorear las condiciones internas de la muestra; y transductores lineales diferenciales variables (TLDV), que registran la deformación axial y lateral con alta precisión.

Figura 88. Equipo Triaxial cíclico GCTS usado para esta investigación.



3.5.2 El procedimiento del ensayo

El procedimiento utilizado sigue la norma técnica de ensayo E-156-11 del Instituto Nacional de Vías, basada en la norma AASHTO T 307-99 (2012). A continuación, se resume el proceso:

- Paso 1. Ensamble de la cámara triaxial. En esta etapa se ubica la muestra sobre la piedra porosa, seguido se coloca cuidadosamente la membrana sobre la muestra y se sella con un aro de caucho o goma. Seguidamente se conecta la línea de drenaje y se aplica vacío y se coloca la cámara sobre la placa de base y la placa de cubierta. Se ubica el pistón de carga y se ajustan los tornillos tensores de la cámara.
- Paso 2. Acondicionamiento de cargas. Después de alineada la cámara, se ubican los LTDV, se abren las válvulas y se aplica la presión de confinamiento de pre-acondicionamiento equivalente a 41 kPa. En esta etapa se recomienda verificar que la carga axial del pistón sea positiva y sea lo suficiente para que se mantenga positiva luego de aplicar la presión de confinamiento. Ya que, si la carga está en cero, cuando el pistón recibe la presión de confinamiento este sube actuando como una carga negativa y esta a su vez obliga al pistón a subir y el ensayo se pierde.

Figura 89. Ensamble de la cámara axial, Universidad Eafit.



Paso 3. Secuencia de ensayos. En esta etapa se seleccionan las secuencias del ensayo conforme al tipo de suelo y posición de la muestra en la estructura del pavimento. Para esta investigación se usó la secuencia 1, que corresponden a suelos finos granulares ubicados en subrasantes.

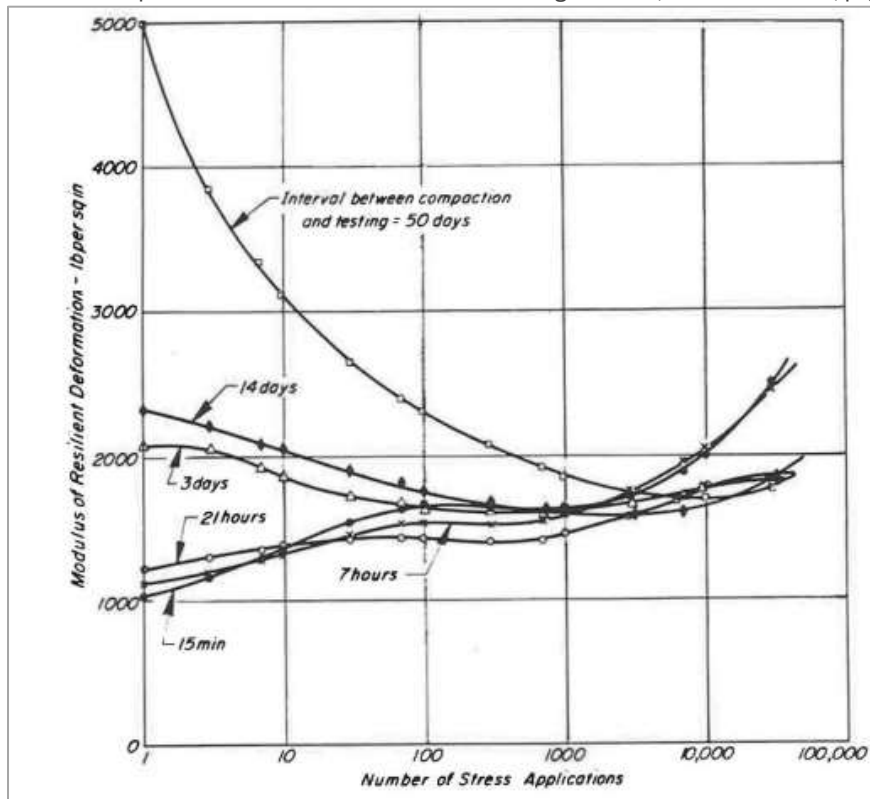
Tabla 31. Secuencia de ensayo para suelos de subrasante.

Secuencia	Presión de Cámara S3		Esfuerzo axial máximo $S_{\text{máx.}}$		Esfuerzo Cíclico $S_{\text{cíclico}}$		Esfuerzo constante $0.1S_{\text{máx}}$		Número de aplicaciones de carga
	kPa	lbf/plg ²	kPa	lbf/plg ²	kPa	lbf/plg ²	kPa	lbf/plg ²	
0	41.4	6.0	27.6	4.0	24.8	3.6	2.8	0.4	500-1000
1	41.4	6.0	13.8	2.0	12.4	1.8	1.4	0.2	100
2	41.4	6.0	27.6	4.0	24.8	3.6	2.8	0.4	100
3	41.4	6.0	41.4	6.0	38.3	5.6	4.1	0.6	100
4	41.4	6.0	55.2	8.0	49.7	7.2	5.5	0.8	100
5	41.4	6.0	68.9	10.0	62	9.0	6.9	1.0	100
6	27.6	4.0	13.8	2.0	12.4	1.8	1.4	0.2	100
7	27.6	4.0	27.6	4.0	24.8	3.6	2.8	0.4	100
8	27.6	4.0	41.4	6.0	37.3	5.4	4.1	0.6	100
9	27.6	4.0	55.2	8.0	49.7	7.2	5.5	0.8	100
10	27.6	4.0	68.9	10.0	62	9.0	6.9	1.0	100
11	13.8	2.0	13.8	2.0	12.4	1.8	1.4	0.2	100
12	13.8	2.0	27.6	4.0	24.8	3.6	2.8	0.4	100
13	13.8	2.0	41.4	6.0	37.3	5.4	4.1	0.6	100
14	13.8	2.0	55.2	8.0	49.7	7.2	5.5	0.8	100

15	13.8	2.0	68.9	10.0	62	9.0	6.9	1.0	100
----	------	-----	------	------	----	-----	-----	-----	-----

Paso 4. Tixotropía. Antes de iniciar la prueba se debe pre acondicionar las muestras luego del tiempo de reposo o tiempo de curado. Esto se debe a que desde 1961, Seed, Mitchell y Chan, identificaron que el módulo resiliente aumenta con la edad de reposo. En la Figura 90 se observa que el módulo resiliente de 6 muestras de diferentes edades converge luego de 500 ciclos de carga.

Figura 90. Efecto de la tixotropía en el Módulo Resiliente de suelos finos granulares, tomado de [274], página 22.



Aplicación de ciclos de carga. Inmediatamente después de finalizar los 500 ciclos de carga por tixotropía o pre-acondicionamiento, se continúa aplicando los ciclos de carga de la Tabla 31. El software registra los últimos cinco ciclos, con sus respectivas deformaciones, esfuerzos, lecturas de los TLDV por separado y el promedio de los dos TLDV. Se debe verificar que cada 5 secuencias, cambie la presión de confinamiento que inicia en 41 KPa para los primeros 5 secuencias, se reduce a 28 KPa para las 5 secuencias siguientes y finaliza con 14 KPa.

De otro lado, se debe revisar que las pulsaciones de esfuerzo registren formas sinusoidales (Ver Figura 91). Cada suelo tiene una dureza distinta y en algunos casos, como esta, la potencia del

impacto (PID) puede provocar un rebote no controlado que aumenta la deformación permanente y reduce el módulo resiliente leído.

Figura 91. Registro visual del ensayo y diagrama de pulsos de carga con su respectiva deformación.



3.5.3 Resultados

Este análisis muestra que la variabilidad en la fabricación de las muestras está influenciada principalmente por el tipo de suelo empleado. Las muestras elaboradas con el residuo 1 (SC) registraron las mayores densidades, lo que sugiere una mayor compactación y menor contenido de vacíos. Por otro lado, las muestras con menor densidad fueron las que utilizaron el residuo 3 (CH), lo que puede estar relacionado con su mayor contenido de material orgánico y su menor compactabilidad.

En cuanto a la humedad, las mezclas con arena presentaron valores más bajos debido a su menor capacidad de retención de agua. En cambio, las muestras elaboradas con arcillas mantuvieron niveles de humedad relativamente constantes, entre el 27% y el 29%, lo que confirma la alta capacidad de absorción de estos materiales. Estos resultados reflejan cómo las propiedades intrínsecas de cada tipo de suelo afectan el comportamiento de las mezclas de suelo-cemento y deben ser consideradas en el diseño y la aplicación de pavimentos y estructuras geotécnicas.

Tabla 32. Datos iniciales de las 27 muestras falladas.

Suelo	Temperatura	Masa ensayo	Humedad	Densidad	Esbeltez	Densidad seca
CH	10	315.95	29.0%	1.548	1.95	1.20
CH	10	322.23	28.5%	1.510	2.04	1.17

Suelo	Temperatura	Masa ensayo	Humedad	Densidad	Esbeltez	Densidad seca
CH	10	323.48	29.0%	1.545	2.00	1.20
CH	28	322.64	30.2%	1.610	1.95	1.24
CH	28	321.72	30.3%	1.565	1.97	1.20
CH	28	316.64	28.7%	1.590	1.91	1.23
CH	40	320.84	29.9%	1.568	1.95	1.21
CH	40	317.98	29.8%	1.555	1.95	1.20
CH	40	314.60	29.5%	1.536	1.96	1.19
CL	10	369.59	28.3%	1.897	1.90	1.48
CL	10	367.25	28.9%	1.899	1.91	1.47
CL	10	368.21	29.1%	1.874	1.92	1.45
CL	28	374.70	26.9%	1.845	1.97	1.45
CL	28	368.74	26.8%	1.852	1.93	1.46
CL	28	367.46	26.9%	1.860	1.92	1.47
CL	40	366.89	27.4%	1.875	1.92	1.47
CL	40	365.12	27.0%	1.866	1.92	1.47
CL	40	364.00	27.0%	1.866	1.92	1.47
SC	10	363.85	9.3%	1.772	1.97	1.62
SC	10	356.47	8.7%	1.745	1.96	1.61
SC	10	351.61	9.5%	1.727	1.96	1.58
SC	28	360.85	11.0%	1.779	1.96	1.60
SC	28	361.68	10.9%	1.768	1.97	1.59
SC	28	367.03	11.7%	1.787	1.97	1.60
SC	40	361.96	9.1%	1.777	1.95	1.63
SC	40	364.25	9.6%	1.790	1.95	1.63
SC	40	362.37	9.8%	1.781	1.97	1.62

El análisis de estadística descriptiva mostró que la densidad seca de las muestras sigue una distribución normal, a pesar de que el tipo de suelo tiene un efecto significativo en su variabilidad ($Pr < 0.05$). Esto indica que, aunque los diferentes tipos de suelos afectan la densidad seca, los datos se distribuyen de manera homogénea y predecible dentro de cada grupo de muestra.

Este resultado es clave para la validación del modelo, ya que confirma que las diferencias en densidad seca entre los tipos de suelo no se deben a valores atípicos o anomalías en la fabricación de las muestras, sino a características propias del material. Así, se puede continuar con la modelación estadística con la confianza de que las variaciones en la densidad están bien representadas en el conjunto de datos.

```

Simple <- glm(Densidad.seca ~ Soil)
Analysis of Deviance Table (Type II tests), Response: Densidad seca
LR Chisq Df Pr(>Chisq)
Soil      2729.2  2  < 2.2e-16 ***

```

Los indicadores de la Tabla 33 confirman que la distribución de los datos de densidad presenta una tendencia central bien definida. Sin embargo, los valores de curtosis y simetría muestran que la distribución está sesgada hacia la izquierda y tiene una forma platicúrtica. Esto significa que los datos presentan colas menos pronunciadas y un pico más achatado en comparación con una distribución normal.

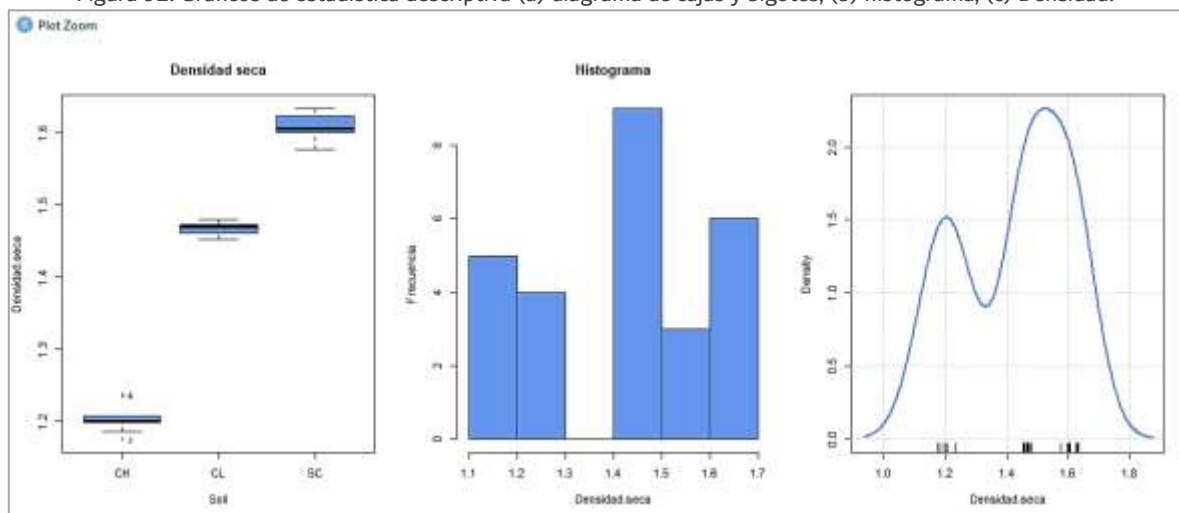
Este comportamiento puede estar relacionado con la variabilidad en los materiales utilizados y su compactación, lo que sugiere que las densidades más bajas son más frecuentes que las más altas. A pesar de esto, la distribución sigue siendo útil para el análisis estadístico, ya que no presenta valores extremos que afecten la validez del modelo.

Tabla 33. Indicadores de estadística descriptiva.

Forma		Tendencia central		Variabilidad	
Curtosis	-1.569271	Media	1.530792	Mínimo	1.17493
Simetría	-0.322188	Mediana	1.468979	Máximo	1.632895
C. de variación	12.03488	Moda	1.530792	Varianza	0.02947494
Desviación estándar:					0.1716827

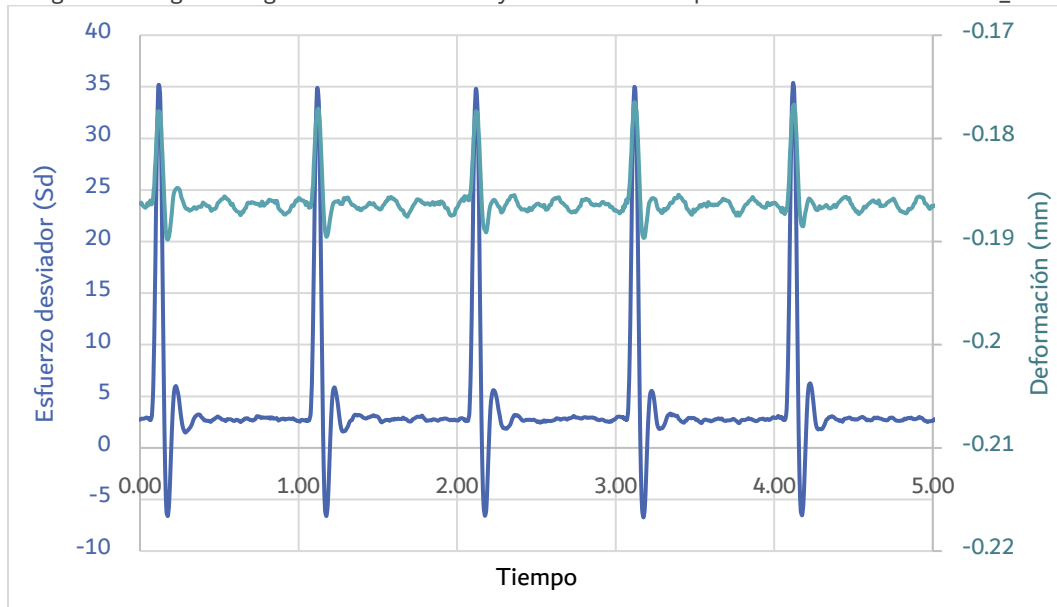
De la misma manera, la varianza de 0.0295 así lo comprueba. El coeficiente de variación es inferior al 0.40 lo que nos indica que la densidad seca tiene una distribución normal con tendencia central que, a pesar de la curtosis negativa, es la muestra es de poca varianza.

Figura 92. Gráficos de estadística descriptiva (a) diagrama de cajas y bigotes, (b) histograma, (c) Densidad.



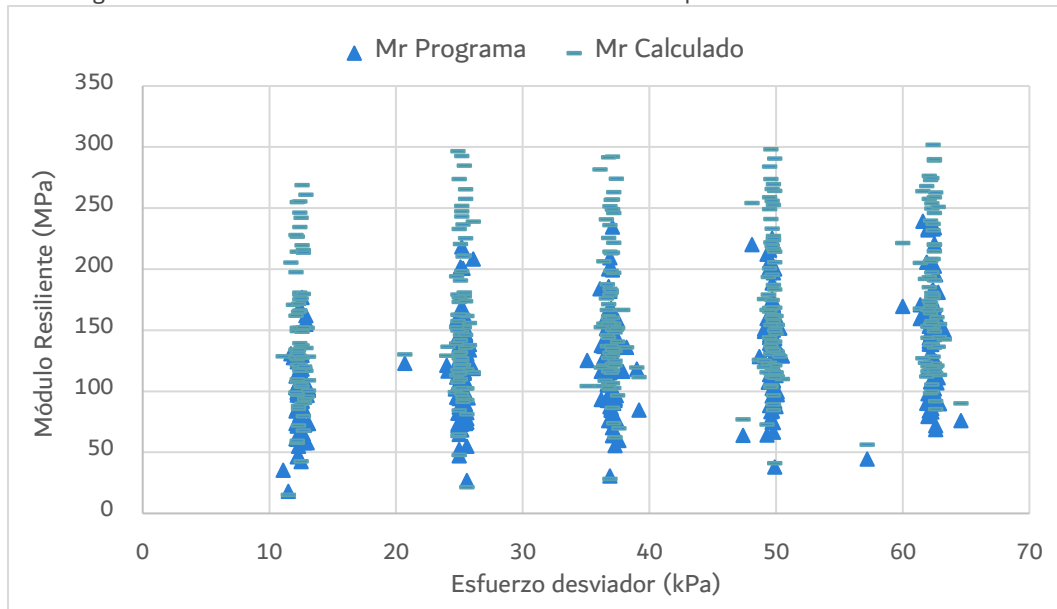
Las muestras mezcladas con cemento mostraban una alta dureza, lo que se convirtió en un reto a la hora de calibrar la potencia de los impulsos de esfuerzos cíclicos, ya que en las gráficas se observaba una deformación adicional debido a un ligero rebote que, de alguna manera, afectaba el resultado final de los módulos. Nótese en la Figura 93 que, cada vez que inicia la pulsación, se forma una curva sinusoidal negativa antes de llegar a la curva sinusoidal positiva y, una vez realizada la descarga, rebota ligeramente. Los rebotes se observan tanto en la gráfica de esfuerzos como en la curva de deformación. Por esta razón, se corrigió el cálculo de los valores dados por el software, de modo que los resultados tuvieran un punto de comparación similar para las 27 muestras.

Figura 93. Diagrama original de esfuerzo cíclico y deformación en la prueba de Módulo resiliente SC_19.



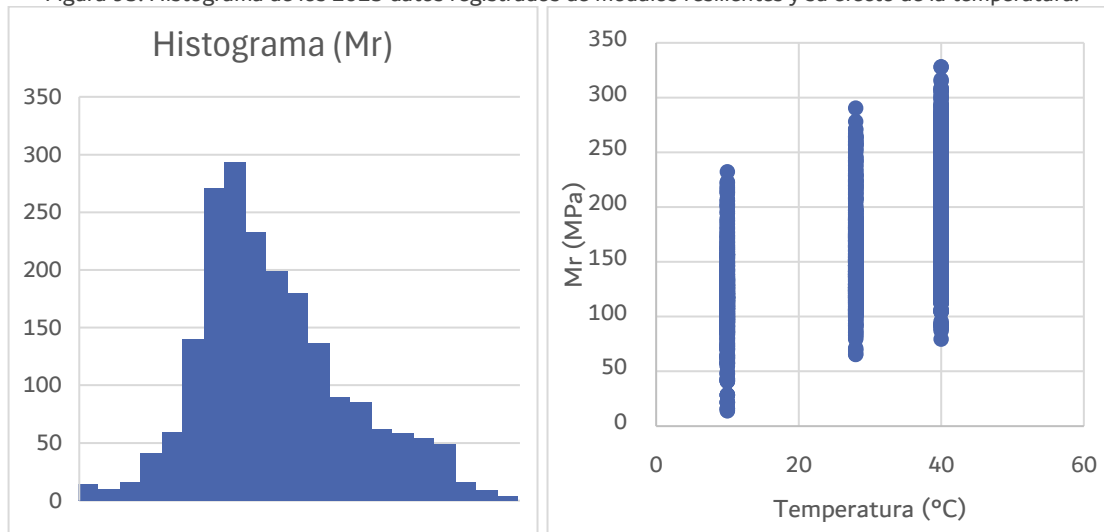
Así fue como se realizó no solo la corrección de los resultados por esbeltez, sino también por el efecto de la potencia (PDI) de la carga cíclica, lo que generó una variabilidad en los resultados que va desde el 8% para las muestras más blandas hasta el 34% para las muestras más rígidas. Cabe aclarar que el efecto no se presentó en todos los ciclos de carga ni en la totalidad de las secuencias. Sin embargo, para efectos estadísticos, se aplicó el mismo tratamiento de corrección a todas las muestras.

Figura 94. Módulo resiliente en función del esfuerzo desviador promedio de los 5 últimos ciclos.



De las 27 muestras, se obtuvieron 2025 datos de módulos resilientes, tomados de 15 secuencias de esfuerzos desviadores (S_d), medidos en los últimos 5 ciclos de cada secuencia. Estos datos mostraron una distribución normal, leptocúrtica y ligeramente sesgada hacia la izquierda, como se muestra en el histograma de la Figura 95.

Figura 95. Histograma de los 2025 datos registrados de módulos resilientes y su efecto de la temperatura.

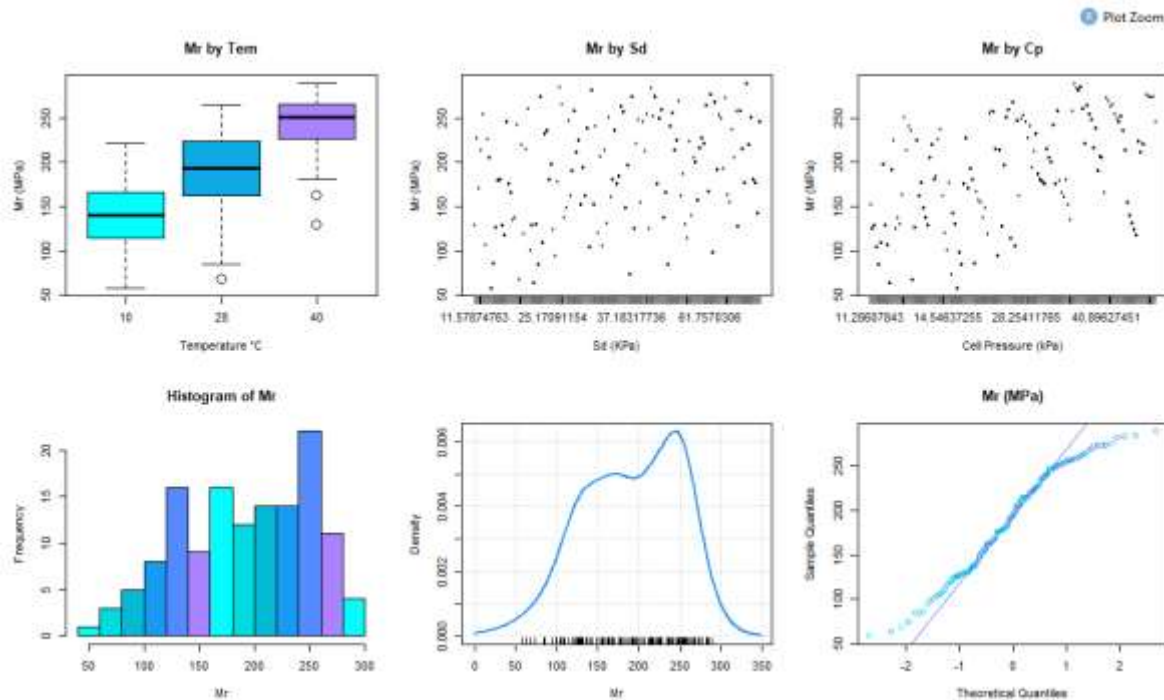


La figura también muestra el efecto de la temperatura de curado en los resultados registrados, indicando que, a mayores temperaturas, los módulos resilientes serán más altos. En cambio, a bajas temperaturas, las muestras presentan una mayor variabilidad y una menor magnitud en los resultados.

Al organizar los datos por tipo de suelo con solo cuatro variables, el módulo resiliente como variable de respuesta, y la temperatura, el esfuerzo desviador y la presión de cámara como variables categóricas, se observa una tendencia creciente entre el módulo resiliente, la temperatura de curado y la presión de cámara.

Sin embargo, el diagrama de cajas de la Figura 96, que relaciona el módulo con el esfuerzo desviador, resulta un poco confuso. La descripción estadística indica una distribución normalizada platycúrtica, lo que significa que la tendencia presenta una alta variabilidad.

Figura 96. Gráficos de descripción estadística de los datos usando R Studio para las muestras SC.



Usando R Studio, se validó un modelo lineal multivariado con las cuatro variables, obteniendo como resultado las superficies de respuesta de la Figura 97. Estas muestran una tendencia casi lineal entre la temperatura, la presión de cámara y el esfuerzo desviador. Se observa que la tendencia es creciente, es decir, a medida que aumentan las magnitudes de las variables dependientes, la respuesta también se incrementa.

Código R Studio 12

```
Call:
lm(formula = Mr ~ Sd + Tem + Cp, data = datos)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-71.048 -13.379   1.999  15.297  58.724

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  -2.4698     8.6011  -0.287   0.774
Sd             0.9137     0.1222   7.478 9.66e-12 ***
```

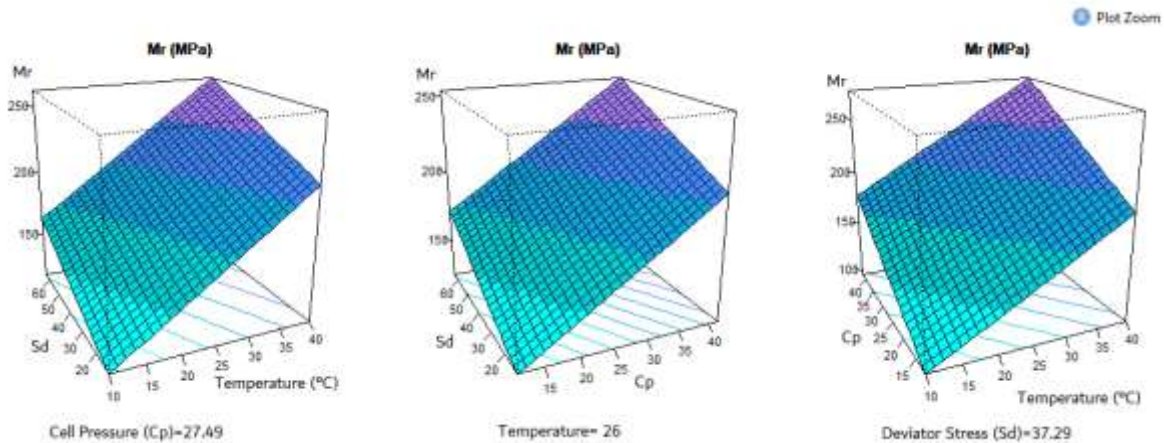
```

Tem      3.2702      0.1739      18.809      < 2e-16 ***
Cp       2.7093      0.1977      13.707      < 2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 24.9 on 131 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8236,    Adjusted R-squared:  0.8196 
F-statistic: 203.9 on 3 and 131 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

Figura 97. Superficies de respuesta de los Módulos resilientes para las muestras SC.



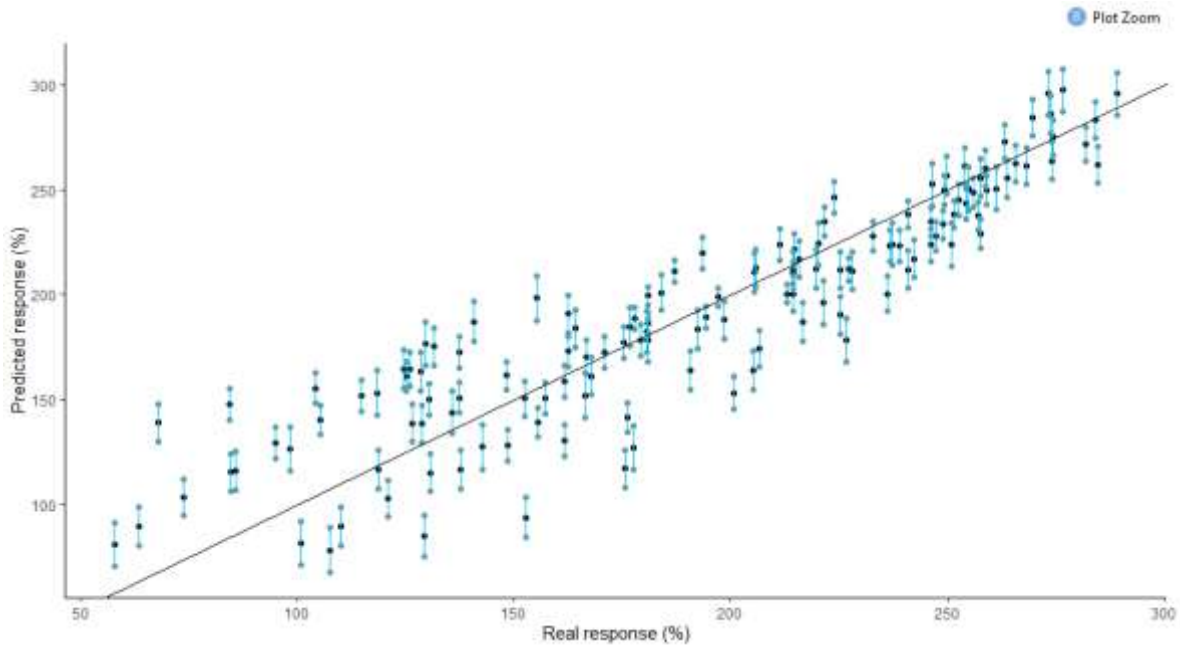
Por último, se elaboró un diagrama que correlaciona los valores predichos por el modelo con los datos registrados en las pruebas, mostrando un R^2 de 0.82 y un p -value inferior a $2.2e-16$.

$$Mr \text{ (MPa)} = -2.4698 + 0.9137Sd + 3.2702Tem + 2.7093Cp$$

Donde:

- Sd = Esfuerzo desviador en kPa,
- Tem = Temperatura en °C
- Cp = Presión de cámara en kPa.

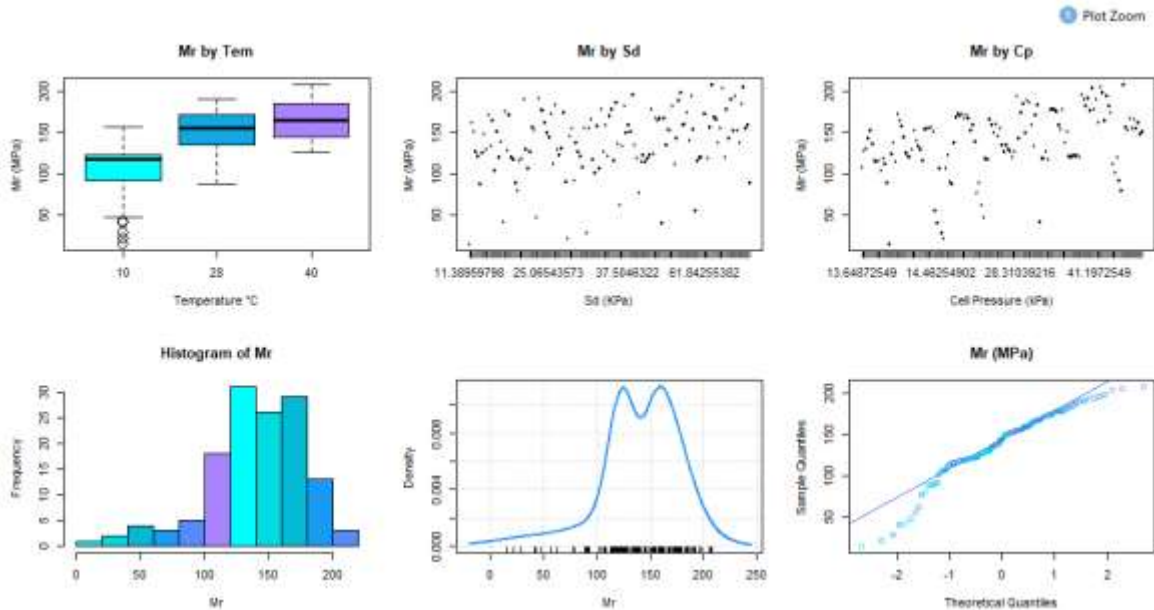
Figura 98. Diagrama de datos predichos y datos medidos en el ensayo con muestras SC.



Del mismo modo, utilizando R Studio, se realizó la descripción estadística de los datos registrados para la mezcla de suelo CL y cemento. Los resultados de simetría son muy cercanos a -1, lo que indica que la curva de densidad está ligeramente sesgada hacia la derecha. Por otro lado, la curtosis está muy cerca de 0, lo que sugiere una distribución mesocúrtica, con poca variabilidad en los resultados.

El diagrama de cajas de la Figura 99 muestra la misma tendencia creciente entre el módulo resiliente y la temperatura de curado.

Figura 99. Gráficos de descripción estadística de los datos usando R Studio para las muestras CL.



A continuación, se presenta el modelo lineal de los datos para las muestras marcadas como CL. Con un R^2 de 0.65, se evidencia que el modelo no es lo suficientemente preciso, lo que sugiere que el comportamiento podría no ser completamente lineal. No obstante, para efectos de comparación con las demás muestras, se mantendrá en esta forma.

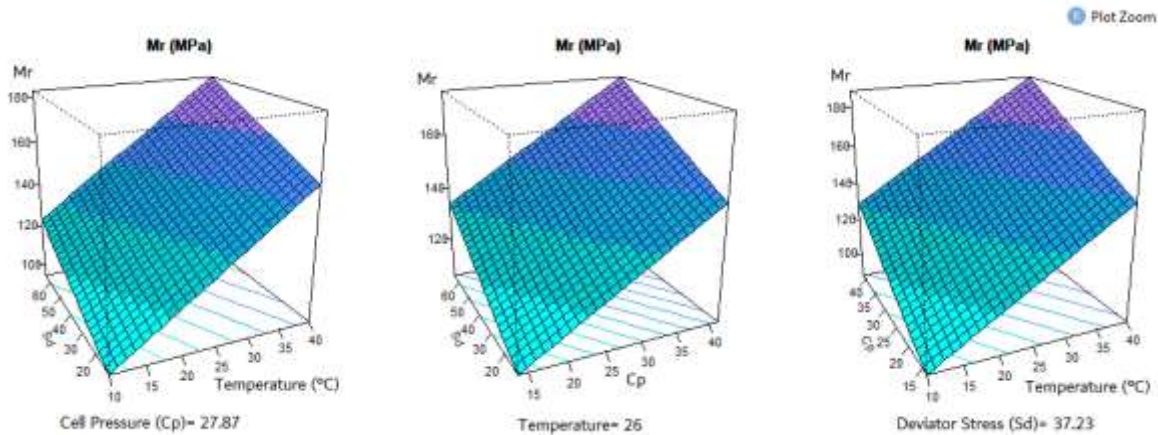
Código R Studio 13

```
Call:
lm(formula = Mr ~ Sd + Tem + Cp, data = datos)
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-60.797 -14.800   2.186  17.054  41.291
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  27.4611     8.0640   3.405 0.000877 ***
Sd           0.5356     0.1143   4.687 6.85e-06 ***
Tem          1.9896     0.1619  12.287 < 2e-16 ***
Cp           1.4804     0.1814   8.160 2.41e-13 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 23.2 on 131 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.6471,    Adjusted R-squared:  0.639
F-statistic: 80.07 on 3 and 131 DF, p-value: < 2.2e-16
```

El análisis ANOVA del modelo muestra que la temperatura, la presión de cámara y el esfuerzo desviador son variables que afectan significativamente los resultados del módulo resiliente.

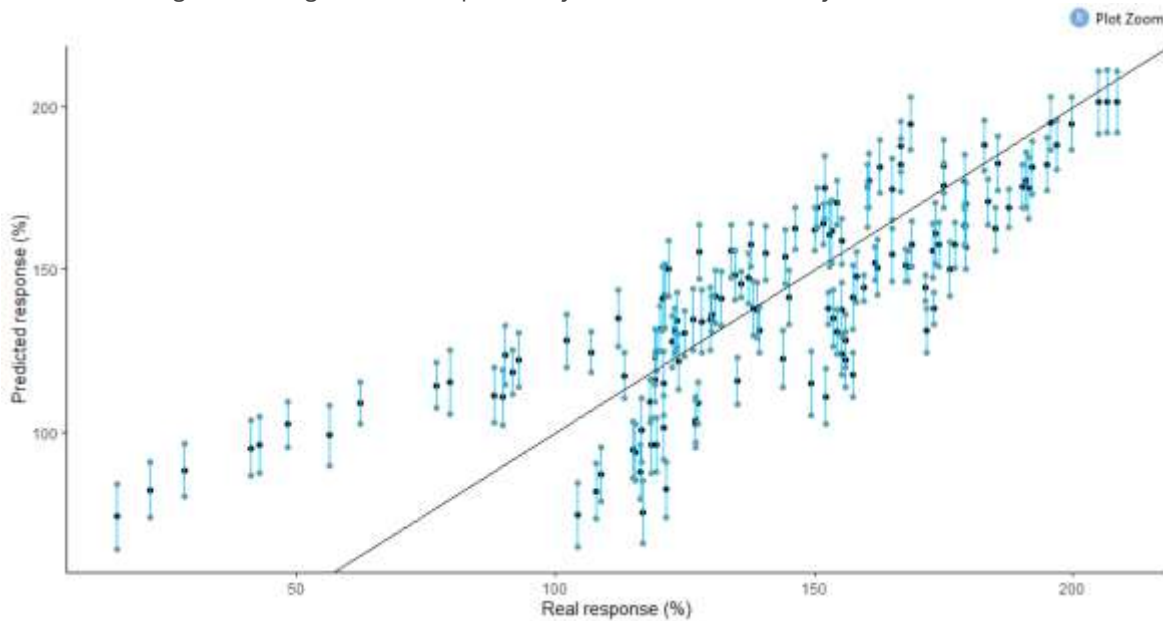
Figura 100. Superficies de respuesta de los Módulos resilientes para las muestras CL.



$$Mr (MPa) = 27.4611 + 0.5356Sd + 1.9896Tem + 1.4804Cp$$

Donde Sd es el esfuerzo desviador en kPa, Tem es la temperatura en °C y Cp es la presión de cámara en kPa.

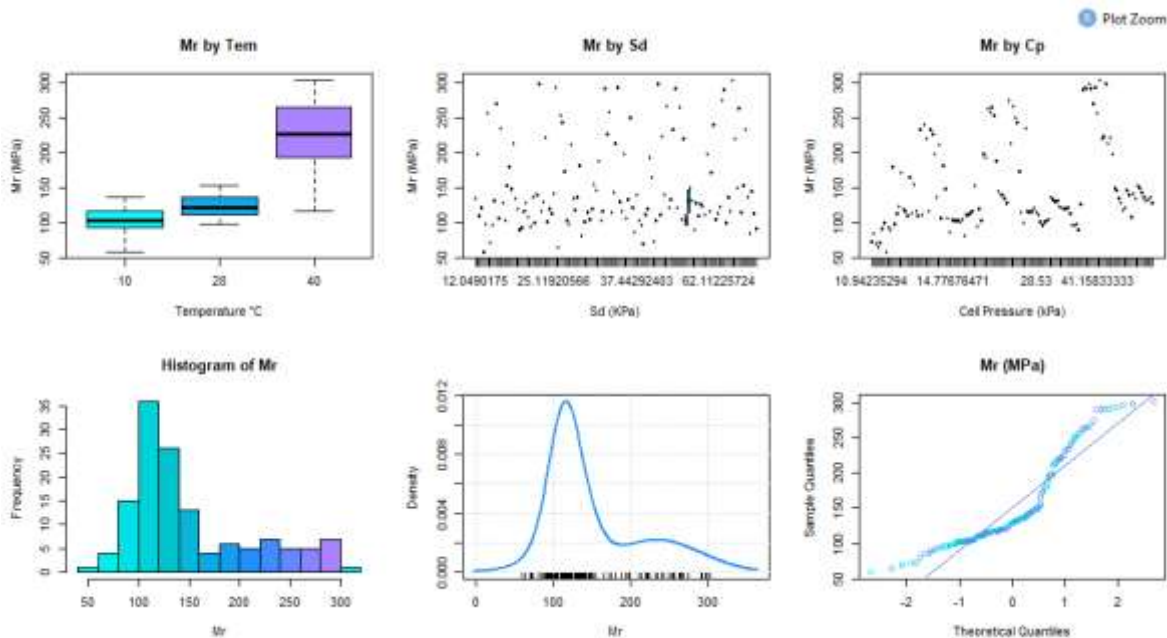
Figura 101. Diagrama de datos predichos y datos medidos en el ensayo con muestras CL.



Se aplicó el mismo tratamiento a los datos registrados de las muestras CH. Estos, a su vez, muestran una tendencia más pronunciada y no lineal en el efecto de la temperatura sobre los módulos de resiliencia.

Los gráficos de esfuerzo desviador (S_d) y presión de cámara (C_p) siguen sin mostrar una trayectoria clara. La simetría es de 0.99, lo que indica que la distribución está sesgada hacia la derecha, mientras que el coeficiente de curtosis es de -0.19, señalando que se trata de una distribución leptocúrtica.

Figura 102. Gráficos de descripción estadística de los datos usando R Studio para las muestras CH.



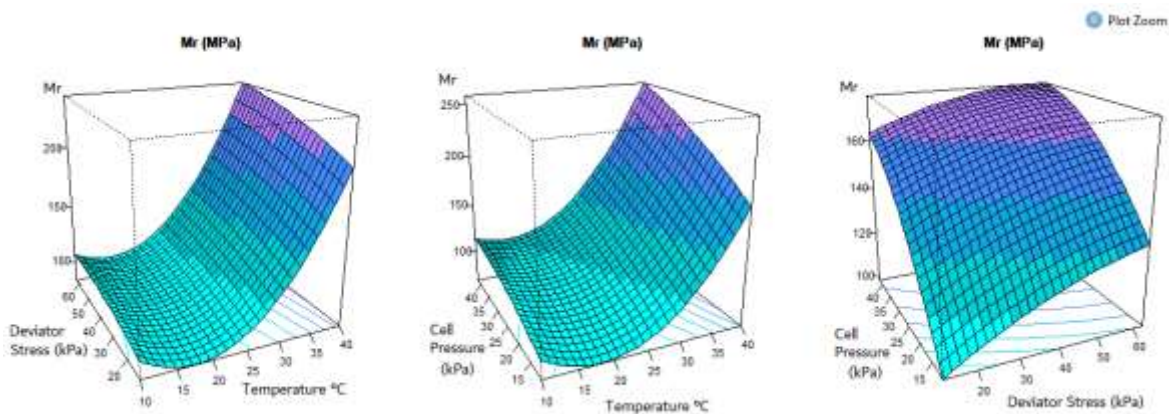
El modelo lineal registró un R^2 de 0.78 y un p-value inferior a $2.2e-16$, lo que indica, al igual que en las muestras anteriores, que la temperatura, la presión de cámara y el esfuerzo desviador afectan significativamente los resultados de los módulos resilientes.

Código R Studio 14

```
Call:
lm(formula = Mr_T ~ Sd + Cp + Tem, data = datos)
Mr_T<-Mr^-0.5117383
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.011166 -0.006216  0.001198  0.005507  0.017116
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.242e-01  2.433e-03  51.046 < 2e-16 ***
Sd          -1.288e-04  3.456e-05  -3.727 0.000287 ***
Cp          -4.720e-04  5.415e-05  -8.716 1.11e-14 ***
Tem         -9.773e-04  4.898e-05 -19.953 < 2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
Residual standard error: 0.007016 on 131 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.7884,    Adjusted R-squared:  0.7835
F-statistic: 162.7 on 3 and 131 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

En este caso particular, la variable respuesta no estaba normalizada, es decir que los datos no cumplían la condición de normalidad. Por esta razón, se realizó la transformación de la respuesta mediante la ecuación $Mr_T = Mr^{-0.5117383}$.

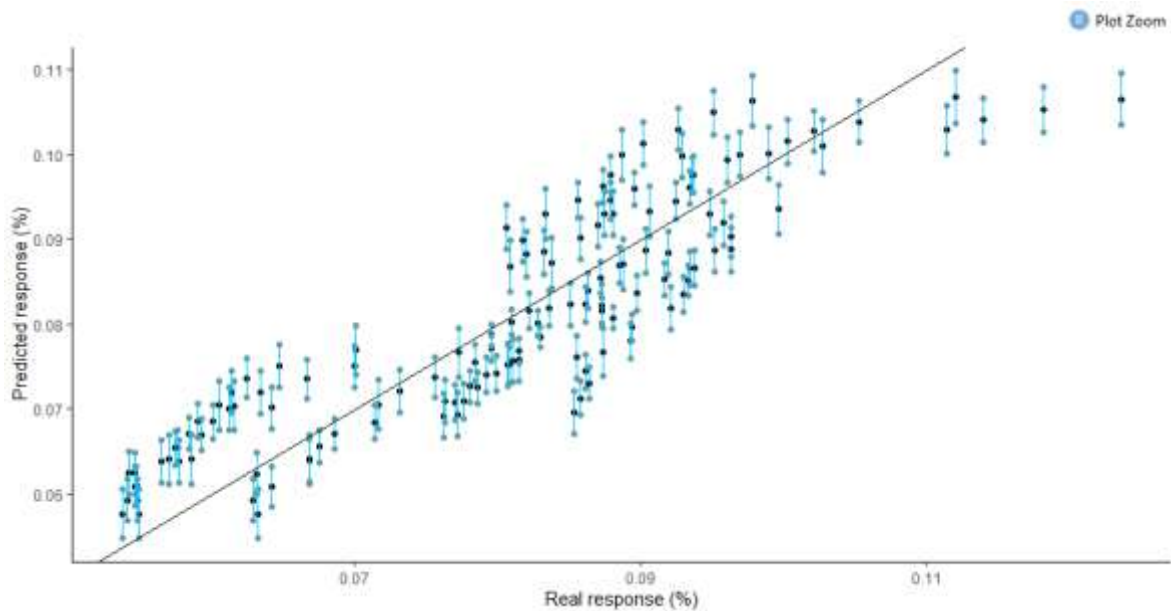
Figura 103. Superficies de respuesta de los Módulos resilientes para las muestras CH.



$$Mr (MPa)^{-0.5117383} = 0.124 - 0.0001288Sd - 0.000472Cp - 0.0009773Tem$$

Donde Sd es el esfuerzo desviador en kPa, Tem es la temperatura en °C y Cp es la presión de cámara en kPa.

Figura 104. Diagrama de datos predichos y datos medidos en el ensayo con muestras CH.



Por último, se realizó la descripción estadística de los datos observados, consolidando todos los resultados de los tres tipos de suelo.

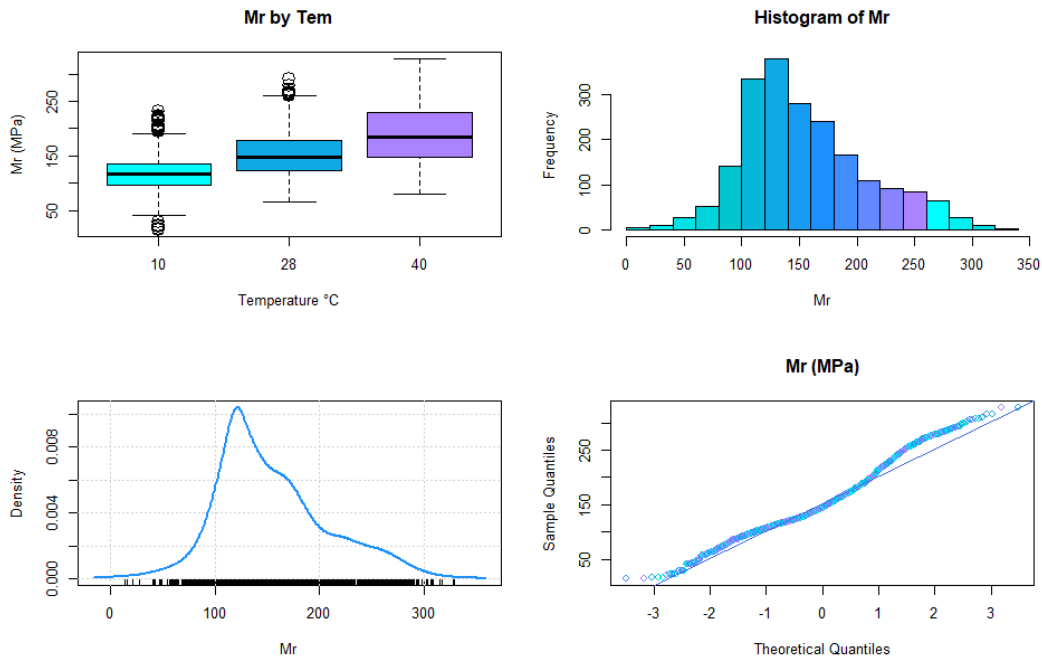
Como se observa en la Figura 105, el diagrama de cajas mantiene la tendencia creciente entre la temperatura de curado y el módulo resiliente. Los valores más altos del módulo corresponden a las muestras curadas a 40°C.

Por otro lado, en los gráficos del esfuerzo desviador y la presión de cámara no se observa una tendencia definida.

El histograma y la curva de densidad muestran con mayor claridad una simetría positiva, es decir, la distribución está ligeramente sesgada hacia la derecha. Además, se observa una distribución mesocúrtica, lo que brinda cierta confianza, ya que la varianza tiende a disminuir a medida que aumenta el número de datos.

Figura 105. Gráficos de descripción estadística de los datos usando R Studio, consolidado general.

Plot Zoom



El supuesto de normalidad de los resultados de los módulos resilientes es muy inferior a lo requerido. Por esta razón, al igual que en la muestra CH, se procede a realizar la transformación de la variable mediante la ecuación $Mr_T = Mr^{0.58066}$, obteniendo un R^2 de 0.73 y un p -value inferior a 2.2×10^{-16} .

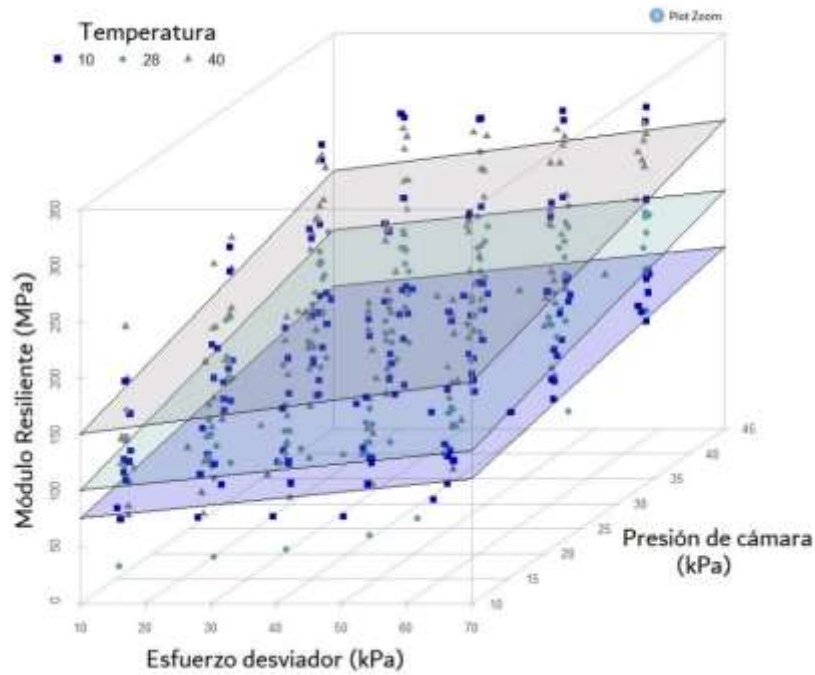
Código R Studio 15

```
Call:
lm(formula = Mr_T ~ Sd + Cp + Tem + Soil, data = datos)
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-6.7334 -1.4025 -0.1054  1.2607  4.8818
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  7.832118   0.515145  15.204 < 2e-16 ***
Sd           0.045578   0.007312   6.233 1.16e-09 ***
Cp           0.135485   0.011627  11.652 < 2e-16 ***
Tem          0.212665   0.010376  20.496 < 2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 2.1 on 399 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.7344,    Adjusted R-squared:  0.7311
F-statistic: 220.7 on 5 and 399 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

En este caso, como la transformación es positiva, las superficies de respuesta presentan una tendencia creciente y lineal.

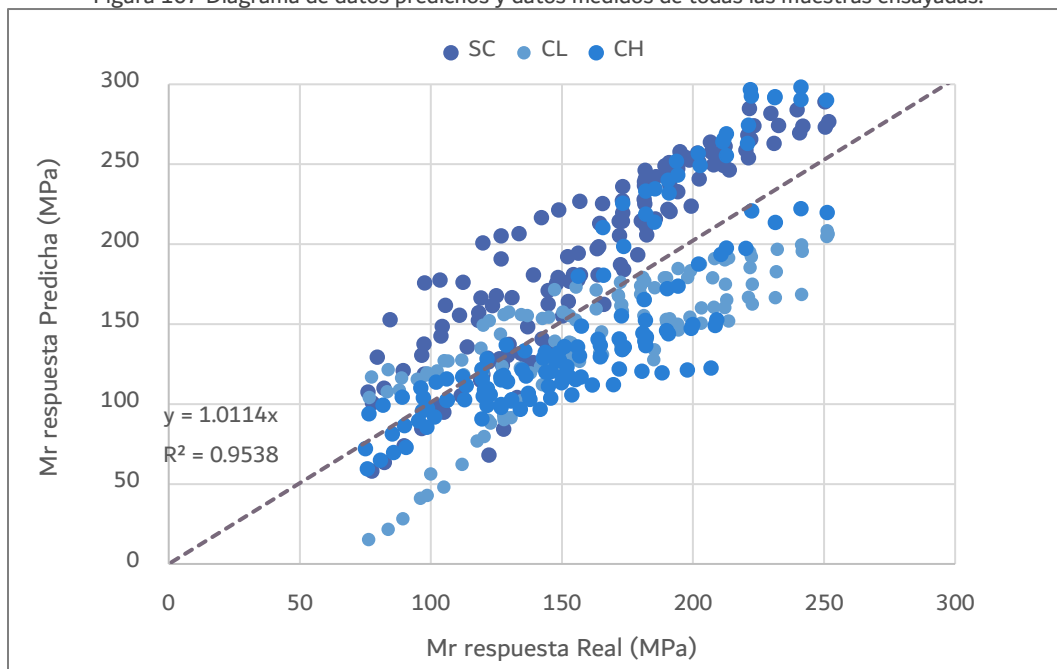
Figura 106. Superficies de respuesta de los Módulos resilientes, consolidado general.



$$Mr(MPa)^{0.58066} = 7.832118 + 0.045578Sd + 0.135485Cp + 0.212665Tem$$

En la siguiente figura se presenta el diagrama que relaciona los datos calculados o predichos con los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio. En el gráfico, cada tipo de residuo utilizado se representa con un color diferente.

Figura 107 Diagrama de datos predichos y datos medidos de todas las muestras ensayadas.



4 CAPÍTULO III: MODELACIÓN DE LA RED NEURONAL ARTIFICIAL

Resumen

Las necesidades actuales del mundo en cuanto al consumo de energía, el calentamiento global y la explotación minera han motivado el desarrollo de esta investigación.

El estudio tiene como objetivo validar estadísticamente, a través de modelos de regresión y redes neuronales, tres mezclas de residuos arcillosos y cemento. Para ello, se registraron un total de 2026 puntos de datos provenientes de pruebas experimentales de laboratorio, con el fin de analizar el efecto de la temperatura de curado sobre la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción indirecta y el módulo resiliente a los 7 días de curado.

Se utilizaron tres tipos de residuos arcillosos mezclados con cemento hidráulico de alta resistencia temprana (Portland Tipo 1). Las muestras fueron curadas en tres cámaras diferentes, cada una con una temperatura constante de 10 °C, 28 °C y 40 °C durante 7 días.

Los resultados indican que la temperatura tiene un efecto positivo sobre el módulo resiliente, lo que podría generar ahorros en el consumo de cemento. Se espera que el modelo de red neuronal artificial desarrollado en este estudio contribuya al diseño y construcción de pavimentos geotérmicos más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente.

4.1 BASE DE DATOS

Con los resultados registrados en todas las pruebas experimentales, se creó un conjunto de datos (dataset) compuesto por 16 variables y 2026 filas, para un total de 32,416 datos. Una de estas variables es la categórica “Tipo de Suelo”, mientras que las otras quince son numéricas.

Antes de proceder con la modelación de la red neuronal, se revisó, mediante el diagrama de multicolinealidad, cuáles variables numéricas presentan correlación o alguna proporcionalidad entre ellas.

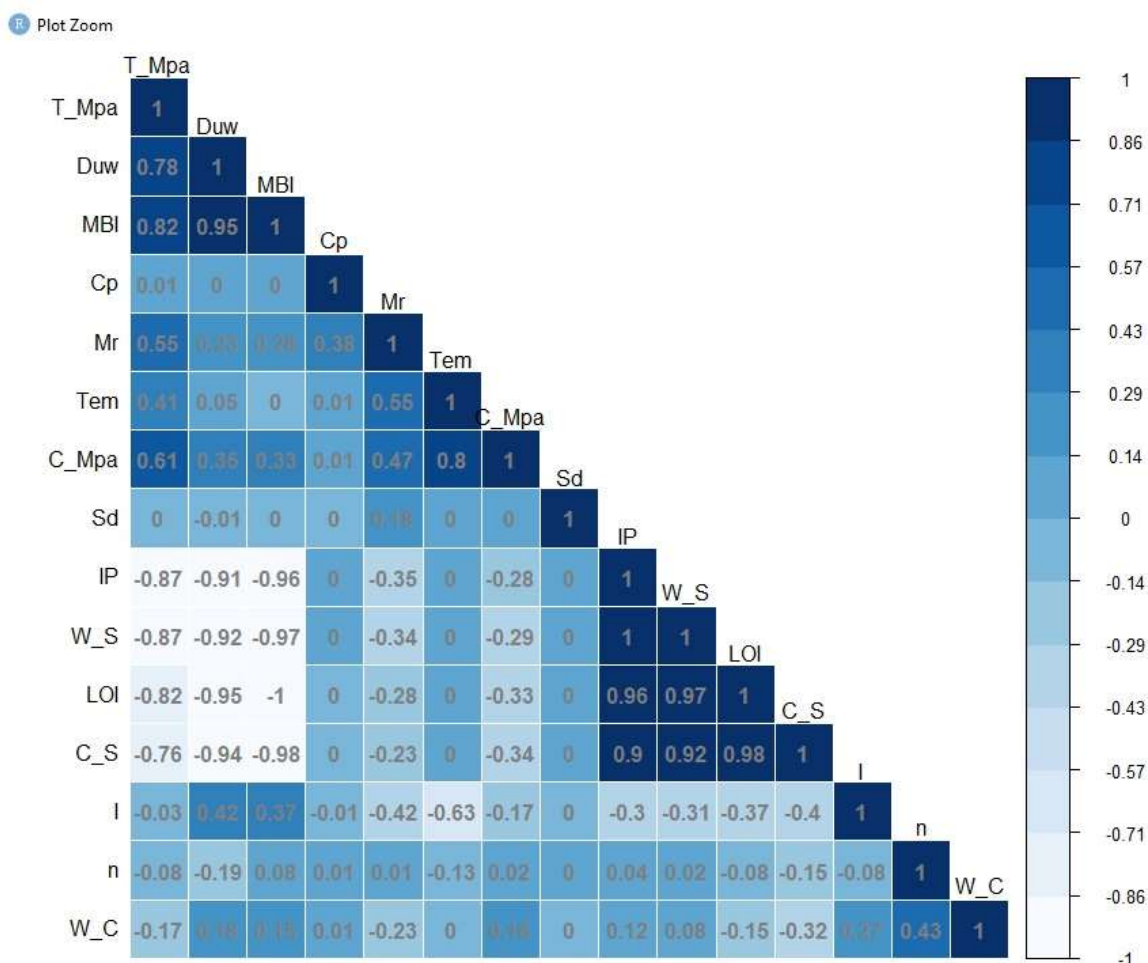
De acuerdo con la las variables numéricas que presentan una multicolinealidad positiva o que son directamente proporcionales (>0.90) son el índice de plasticidad (IP) con el contenido de materia orgánica (LOI), el contenido de agua en la mezcla (W_S), el contenido de cemento (C_S) y la conductividad térmica (I). Por otro lado, las variables que registran una multicolinealidad negativa o que son inversamente proporcionales (<-0.90) son el peso unitario (Duw) con el contenido de cemento (C_S), el contenido de materia orgánica (LOI), el contenido de agua en la mezcla (W_S) y el índice de plasticidad (IP).

Asimismo, el índice de azul de metileno (MBI) presenta una multicolinealidad negativa (<-0.90) con el índice de plasticidad (IP), el contenido óptimo de agua (W_S), el contenido de materia orgánica (LOI), el contenido de cemento (C_S) y el peso unitario seco (Duw).

Figura 108, las variables numéricas que presentan una multicolinealidad positiva o que son directamente proporcionales (>0.90) son el índice de plasticidad (IP) con el contenido de materia orgánica (LOI), el contenido de agua en la mezcla (W_S), el contenido de cemento (C_S) y la conductividad térmica (I). Por otro lado, las variables que registran una multicolinealidad negativa o que son inversamente proporcionales (<-0.90) son el peso unitario (Duw) con el contenido de cemento (C_S), el contenido de materia orgánica (LOI), el contenido de agua en la mezcla (W_S) y el índice de plasticidad (IP).

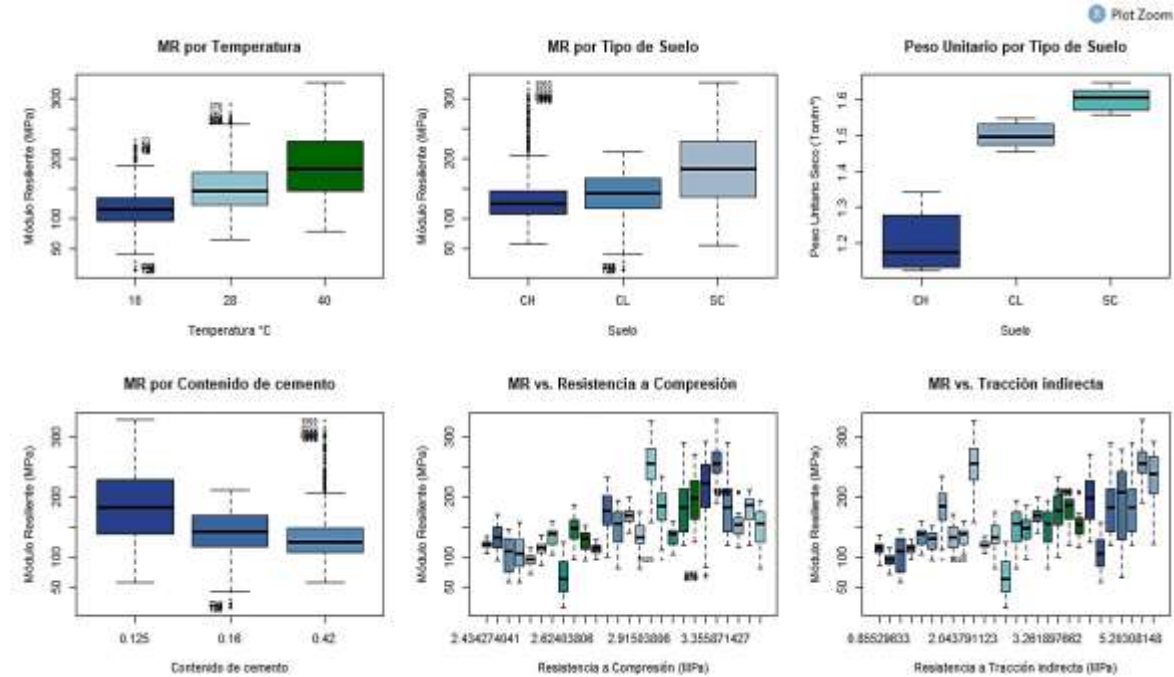
Asimismo, el índice de azul de metileno (MBI) presenta una multicolinealidad negativa (<-0.90) con el índice de plasticidad (IP), el contenido óptimo de agua (W_S), el contenido de materia orgánica (LOI), el contenido de cemento (C_S) y el peso unitario seco (Duw).

Figura 108. Diagrama de multicolinealidad entre las 15 variables numéricas del modelo.



Por otro lado, al realizar la descripción gráfica mediante diagramas de cajas y bigotes, se observa que la variable Módulo Resiliente se ve significativamente afectada por la Temperatura (Tem), el contenido de cemento (C_S), la resistencia a la compresión (C_Mpa) y la resistencia a la tracción indirecta (T_Mpa), como se muestra en la Figura 109.

Figura 109. Diagrama de cajas y bigotes entre el módulo resiliente y a) la temperatura, b) Tipo de suelo, c) Peso unitario y el tipo de suelo, d) Módulo resiliente y el contenido de cemento, e) Presión de cámara y f) el peso unitario.



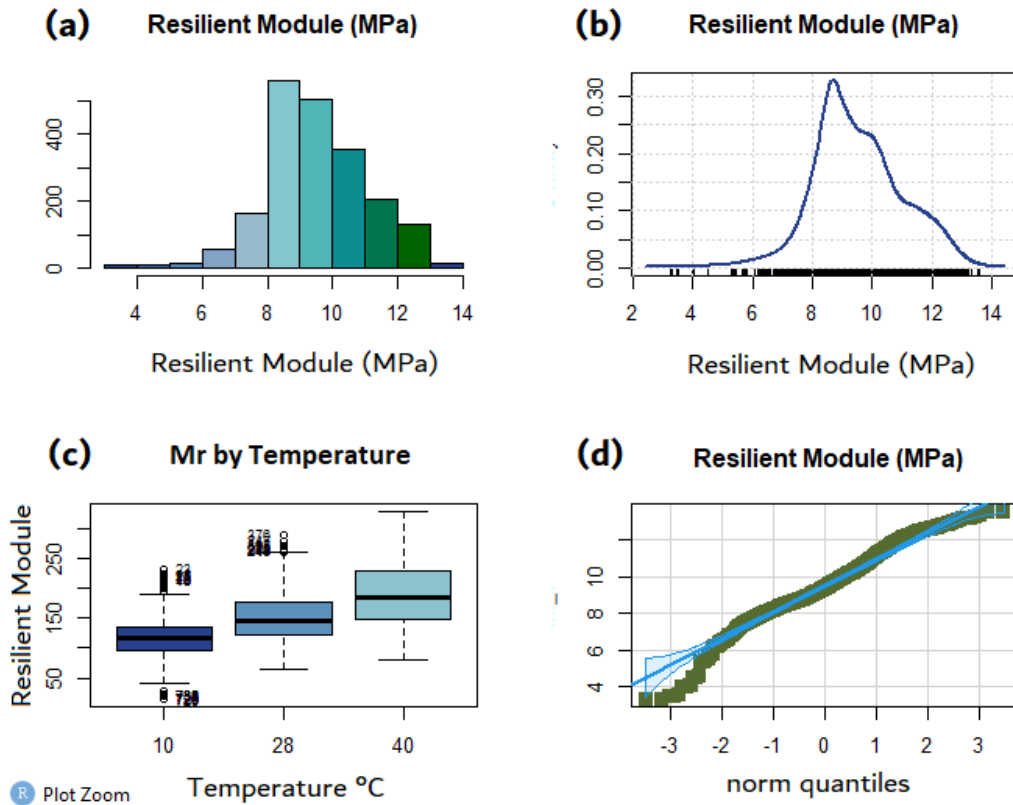
La variable Presión de Cámara muestra una variabilidad dispersa y creciente, lo que sugiere que, a mayor confinamiento, el módulo resiliente también aumenta. En contraste, el peso unitario seco depende del tipo de suelo.

Es importante destacar que en la muestra CH, es decir, el residuo arcilloso con el mayor índice de plasticidad, se observa una mayor dispersión en los resultados en comparación con las arcillas CL y SC. Esto se debe, en gran medida, a que el rango de humedad óptima durante la preparación es más estrecho, como se mencionó en el Título 3.3.4 En consecuencia, incluso una mínima variación en la humedad puede generar cambios significativos en los resultados.

Si bien la literatura sugiere que los modelos basados en redes neuronales artificiales no requieren la verificación de supuestos, se procedió a validar la normalidad de la variable Módulo Resiliente (Mr) para comprender con mayor claridad el efecto de las otras 15 variables. En este caso, los datos fueron transformados mediante la ecuación $Mr_T = Mr^{0.45}$ y su distribución fue validada con la Figura 110.

El análisis gráfico muestra que la distribución es leptocúrtica, con baja variabilidad y un ligero sesgo hacia la derecha, lo que indica que algunos valores pueden ser mayores que la media. Esta tendencia también se observa en el gráfico de densidad y en el gráfico de normalidad por cuantiles. Por último, el diagrama de cajas y bigotes mantiene su tendencia creciente, lo que confirma un efecto significativo sobre la resiliencia.

Figura 110. Normalidad de la variable transformada a) histograma, b) densidad, c) diagrama de cajas y bigotes, c) normalidad por cuantiles.



Antes de proceder con la construcción del modelo de red neuronal, se intentó modelar la matriz de datos utilizando otros métodos, sin éxito. Esto se debe a que la función *lm* (modelo lineal multivariado) tiene un límite en la cantidad de variables que puede analizar, y los métodos de agrupación por factores reducían la confiabilidad del modelo.

4.2 RED NEURONAL ARTIFICIAL USANDO NEURALNET, R STUDIO

Las redes neuronales solo admiten variables numéricas, por lo que las variables categóricas deben transformarse en variables numéricas. En este caso, el tipo de suelo fue caracterizado de manera adecuada mediante el índice de plasticidad, el índice de azul de metileno y las pérdidas por ignición (contenido de materia orgánica). Por esta razón, no fue necesario transformar la variable "Tipo de Suelo"; simplemente se excluyó de la matriz de datos.

A continuación, se presenta el código utilizado en la librería Neuralnet de R Studio. Como se explicó en el marco metodológico, se empleó el algoritmo de retropropagación y la función de activación tanh.

Código R Studio 16

```
model.net = neuralnet (formula = C_S~Tem+Mr+Sd+Cp+n+IP+LOI+MBI+C_Mpa+T_Mpa+Duw,  
                        data=train, hidden = c(5,4), threshold = 0.1,  
                        stepmax = 1e+05, rep = 3,  
                        startweights = NULL, learningrate.limit= NULL,  
                        learningrate.factor = list(minus = 0.5, plus = 1.2),  
                        learningrate = NULL, lifesign = "none",  
                        lifesign.step = 1000, algorithm = "rprop+",  
                        err.fct = "sse", act.fct = "tanh",  
                        linear.output = FALSE, exclude = NULL,  
                        constant.weights = NULL, likelihood = FALSE)
```

Este código obliga a realizar tres repeticiones del modelo con el objetivo de mejorar la precisión en la predicción.

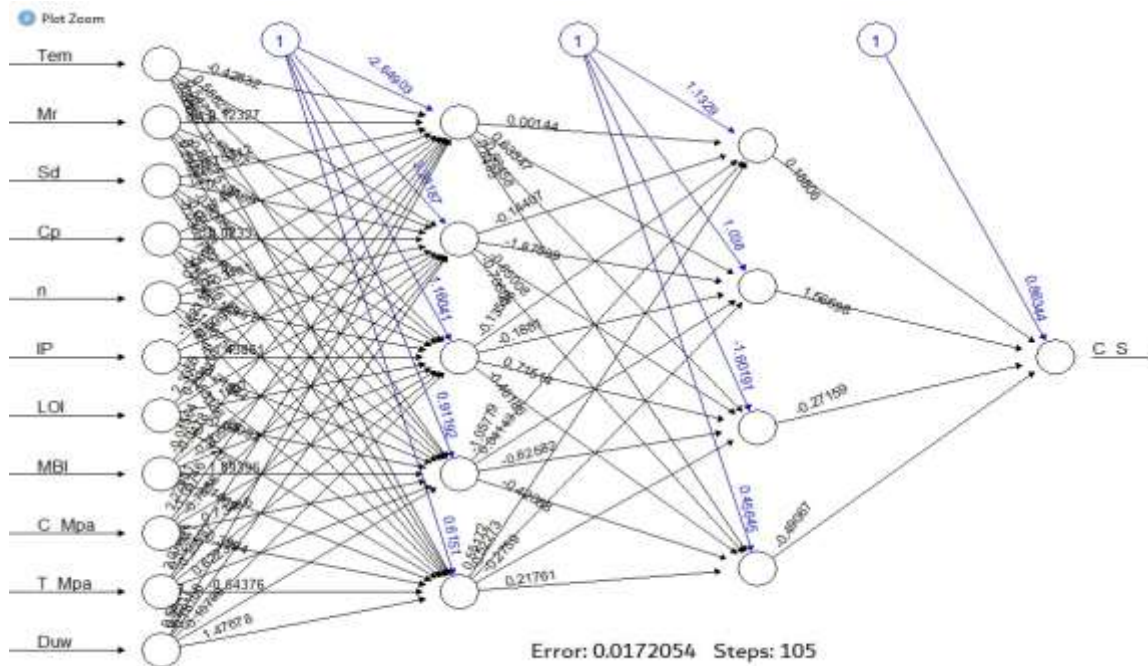
Como se muestra en la Figura 111, la red neuronal está compuesta por:

- Una **capa de entrada** con 11 variables.
- Una **capa de salida**, cuya variable de respuesta es el contenido de cemento en la mezcla.
- Dos **capas ocultas**: la primera con 5 neuronas y la segunda con 4 neuronas.
- Tres **neuronas ocultas de intercepto**, que contribuyen a optimizar el modelo.

Cabe aclarar que el objetivo del modelo es calcular el contenido óptimo de cemento para que una mezcla de residuos arcillosos, con determinadas características físicas y químicas, alcance una resistencia a la compresión, un módulo resiliente y una resistencia a la tracción indirecta suficientes para soportar las cargas del flujo vehicular. Además, el modelo considera la temperatura de curado, que dependerá del clima del lugar donde se instale la mezcla.

Por esta razón, se excluyeron del conjunto de variables el contenido de agua de la mezcla y la relación agua-cemento.

Figura 111. Red Neuronal Artificial, Neuralnet de R Studio.



Los pesos de cada neurona se presentan en la Tabla 34. Con cada repetición del modelo, se observa una mayor precisión en la predicción.

Tabla 34. Matrix de resultados con los pesos de la Red Neuronal Artificial en Neuralnet, R Studio.

	Salida	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
Información del modelo	error	0.06817257	0.032693198	0.0172054
	Umbral (precisión)	0.9073559	0.99892399	0.9833099
	Pasos	906	187	105
De la variable de entrada a la Capa oculta 1, neurona 1	Intercepto	-3.666433	0.869339032	-2.649032111
	Temperatura	0.2081112	1.65819192	-0.428317567
	Módulo Resiliente	-0.03091249	0.08392405	0.123270956
	Esfuerzo desviador	-0.05890885	-0.030592457	0.753121685
	Presión de Cámara	0.01758708	1.397186537	-0.174935055
	Porosidad	0.7350247	0.443255657	0.540498173
	Índice de plasticidad	-1.626242	0.196695323	-1.883152563
	Pérdidas por ignición	-0.2238105	0.118178628	2.335497472
	Índice de Azul de Metileno	-0.9138595	-0.226300332	-0.01564416
	Resistencia a la compresión	0.5329165	0.129840601	2.226812309
	Resistencia a la Tracción	0.660553	0.353674544	2.076344992

	Salida	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
	Peso unitario Seco	-0.1746597	1.523522171	0.588975685
De la variable de entrada a la Capa oculta 1, neurona 2	Intercepto	2.156755	0.409370826	3.381873023
	Temperatura	-1.101032	0.237823241	0.558277005
	Módulo Resiliente	-0.006492421	-0.001966328	-0.135068828
	Esfuerzo desviador	0.000138949	0.015252883	0.121093143
	Presión de Cámara	0.001285453	0.067669165	0.02330278
	Porosidad	0.6932665	0.953449606	0.531813544
	Índice de plasticidad	0.03409626	-0.203885467	-0.599722143
	Pérdidas por ignición	0.4350054	0.526737877	0.296297531
	Índice de Azul de Metileno	0.4536665	1.942111586	-0.047800097
	Resistencia a la compresión	1.869265	-0.563667869	-1.057455785
	Resistencia a la Tracción	0.4097013	-0.15807757	0.329414525
	Peso unitario Seco	0.7633657	1.212214498	0.251698197
De la variable de entrada a la Capa oculta 1, neurona 3	Intercepto	4.919464	-0.694713341	1.160405691
	Temperatura	3.122892	-0.853720851	0.547285071
	Módulo Resiliente	1.68052	0.089415101	-0.685749775
	Esfuerzo desviador	0.2286816	-0.012254267	-0.309558286
	Presión de Cámara	0.442547	-0.180133357	0.218301351
	Porosidad	1.55401	0.076204415	0.189506034
	Índice de plasticidad	1.943037	-0.941718777	-1.438609382
	Pérdidas por ignición	-0.3985368	0.913887505	-1.189702632
	Índice de Azul de Metileno	-2.19752	1.931884094	-0.205978411
	Resistencia a la compresión	6.747184	-0.515010396	-0.785800053
	Resistencia a la Tracción	-1.922772	1.676819686	-0.355970115
	Peso unitario Seco	-1.542762	1.027052865	0.781682849
De la variable de entrada a la Capa oculta 1, neurona 4	Intercepto	-3.790284	1.319844506	0.911924863
	Temperatura	-1.271197	1.276965358	-0.060900382
	Módulo Resiliente	0.009732521	0.155090504	0.376341828
	Esfuerzo desviador	0.006192039	-0.049011371	-0.074333532
	Presión de Cámara	-0.000539467	1.329627265	-0.114158979

	Salida	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
	Porosidad	-0.1942314	0.329083886	-1.267585537
	Índice de plasticidad	-1.246941	0.96218396	-0.218441222
	Pérdidas por ignición	1.359137	0.631923121	-0.040915512
	Índice de Azul de Metileno	-1.713807	0.29520316	1.893962047
	Resistencia a la compresión	1.674157	0.282703972	0.734059557
	Resistencia a la Tracción	1.435736	1.288312395	0.622328924
	Peso unitario Seco	-1.104287	1.408923672	-0.107987788
De la variable de entrada a la Capa oculta 1, neurona 5	Intercepto	3.350519	3.008896942	0.615102661
	Temperatura	-1.824819	0.237559393	0.556596391
	Módulo Resiliente	-0.1589736	-0.029472784	0.296527107
	Esfuerzo desviador	-6.259908	-0.027556867	-0.036408467
	Presión de Cámara	0.07888623	1.715541995	-0.067898406
	Porosidad	-0.259533	2.539482436	-0.564621584
	Índice de plasticidad	1.193779	0.738356098	-1.533364567
	Pérdidas por ignición	-0.8740673	-2.618885661	0.792018599
	Índice de Azul de Metileno	-2.624162	0.606960403	1.106697595
	Resistencia a la compresión	-4.158277	1.160172671	0.399396859
	Resistencia a la Tracción	0.07732449	0.502522535	-0.543761424
	Peso unitario Seco	1.105151	2.583603795	1.476777003
De la Capa oculta 1 a la Capa oculta 2, neurona 1	Intercepto	0.05281367	-1.73343383	1.132897812
	Neurona 1	0.269168	-2.024059127	0.001439287
	Neurona 2	-0.4501016	-1.268816404	-0.14407003
	Neurona 3	-0.1713898	0.520272286	-0.135557431
	Neurona 4	0.1769686	-1.111793274	-1.057785448
	Neurona 5	0.02776731	-2.775759467	0.551722968
De la Capa oculta 1 a la Capa oculta 2, neurona 2	Intercepto	0.1943108	-2.527004246	1.037998176
	Neurona 1	1.075342	0.644055683	0.63346854
	Neurona 2	1.253203	-0.305867416	-1.875391982
	Neurona 3	1.541064	1.340798667	-0.188104064
	Neurona 4	1.658763	-0.568586745	0.041434866

	Salida	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
	Neurona 5	1.225374	-0.223632804	-0.522729292
De la Capa oculta 1 a la Capa oculta 2, neurona 3	Intercepto	-0.4493517	1.652088976	-1.601906625
	Neurona 1	-1.282942	2.136530682	-0.564583308
	Neurona 2	0.1542692	0.967055332	-0.650076949
	Neurona 3	-1.131474	1.162214805	0.715140041
	Neurona 4	-0.04074338	-0.644516314	-0.625824307
	Neurona 5	-0.862532	0.214470244	-0.27589884
De la Capa oculta 1 a la Capa oculta 2, neurona 4	Intercepto	1.115806	-1.041099049	0.456450163
	Neurona 1	-0.3400358	-0.329422367	0.84849834
	Neurona 2	-1.301507	0.527513139	-0.706060388
	Neurona 3	1.001377	-1.170984146	-0.461852534
	Neurona 4	0.4890822	-0.897187567	-0.420880406
	Neurona 5	-0.03205912	-1.439547537	0.217605809
De la Capa oculta 2 a la Salida	Intercepto	1.612104	-0.135681994	0.863443327
	Neurona 1	2.20336	-0.922755626	0.188057986
	Neurona 2	0.7245772	-0.454044822	1.566983978
	Neurona 3	0.8951501	-1.276294343	-0.271588879
	Neurona 4	0.3798208	-0.193426932	-0.490665969

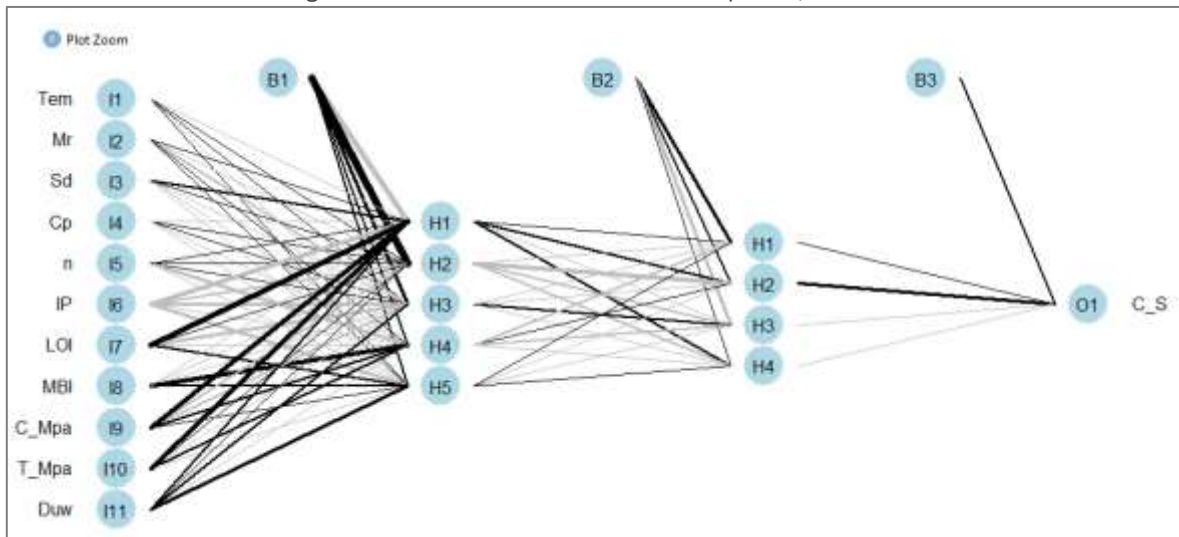
Otra forma gráfica de representar la red neuronal es mediante la herramienta *plotnet* de la librería *Neuralnet*. Esta gráfica facilita la optimización de la arquitectura de la red, ya que resalta con líneas más oscuras y gruesas aquellas conexiones que tienen un mayor peso.

Si la gráfica muestra que una neurona solo tiene conexiones representadas por líneas delgadas y claras, significa que su contribución es redundante y puede eliminarse. Lo mismo ocurre con las capas ocultas: no es necesario incluir un número excesivo si su funcionalidad no aporta al modelo.

En la Figura 112 se observan dos capas con conexiones gruesas tanto en la entrada como en la salida, lo que indica que son esenciales para el modelo.

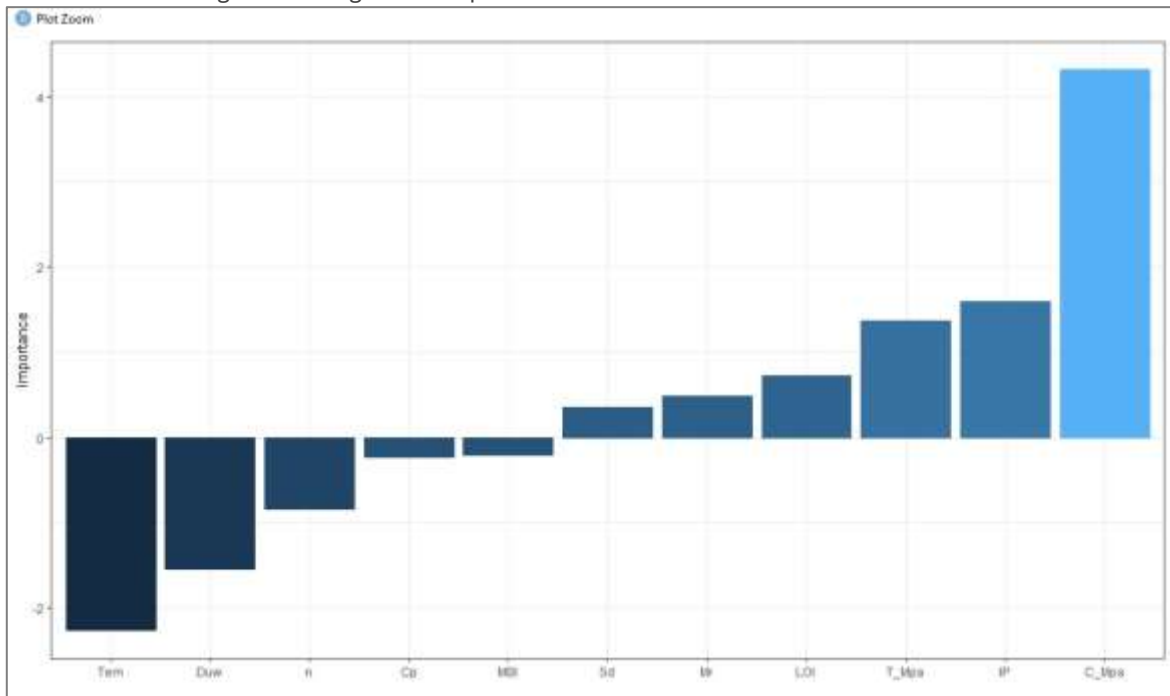
Es importante destacar que, para optimizar la arquitectura de la red neuronal, se realizaron varios entrenamientos con el objetivo de mejorar la confiabilidad del modelo (R^2) y reducir el margen de error.

Figura 112. Red neuronal artificial Neuralnet plotnet, R Studio.



La red neuronal artificial también permite evaluar la importancia de las variables dentro del modelo. En la Figura 113 se observa que la variable porosidad tiene la mayor influencia sobre la resistencia a la compresión (C_Mpa). Le siguen, en orden de importancia, la temperatura (Tem), el peso unitario (Duw), el índice de plasticidad (IP), la propia resistencia a la compresión (C_Mpa) y la resistencia a la tracción indirecta (T_Mpa).

Figura 113. Diagrama de importancia de las variables en la red neuronal artificial.



4.3 RED NEURONAL ARTIFICIAL USANDO H2O, R STUDIO

Otro paquete de R Studio recomendado para el entrenamiento y aplicación de redes neuronales artificiales es H2O. En este caso, el código solo funciona dentro de un entorno de procesamiento en la red H2O con el registro 1726514067493_285.

A continuación, se presentan los resultados del modelo.

Código R Studio 17

```
Model Details:
=====
H2ORegressionMetrics: deeplearning
** Reported on training data. **
** Metrics reported on full training frame **

MSE: 9.89417e-06
RMSE: 0.0031455
MAE: 0.002296434
RMSLE: 0.002446637
Mean Residual Deviance : 9.89417e-06
```

El modelo registra un margen de error inferior al obtenido con *Neuralnet*. Asimismo, el resumen indica que se realizaron 16,080 pruebas de entrenamiento con 10 iteraciones.

En la Tabla 35 se presentan los resultados, donde se observa un R^2 de 0.99779 en la fase de entrenamiento y 0.99772 en la fase de validación.

Tabla 35. Resultados de la Red Neuronal usando H2O.

Velocidad de Entrenamiento	Épocas	Iteraciones	Muestras	Desviación de Validación	Validación RMSE
23647 obs/sec	1	1	1608	0.00600	0.04288
82886 obs/sec	10	10	16080	0.00004	0.00473
Entrenamiento MAE	Entrenamiento R^2	Entrenamiento MAE	Entrenamiento R^2	Validación MAE	Validación R^2
0.06666	0.64568	0.07747	0.00600	0.06653	0.65472
0.00498	0.99779	0.00630	0.00004	0.00505	0.99772

El código no genera una representación gráfica de la distribución de la red neuronal, pero sí indica que el modelo se ejecutó con 4 capas:

- **Capa de entrada:** 13 neuronas, correspondientes a las variables de entrada.
- **Capa de salida:** 1 neurona, equivalente a la variable respuesta.
- **Dos capas ocultas:** cada una con 7 neuronas, con pesos promedio de 0.034135 y -0.0033094, respectivamente, como se muestra en la Tabla 36.

Tabla 36. Parametrización de resultados de la Red Neuronal Artificial en H2O, R Studio.

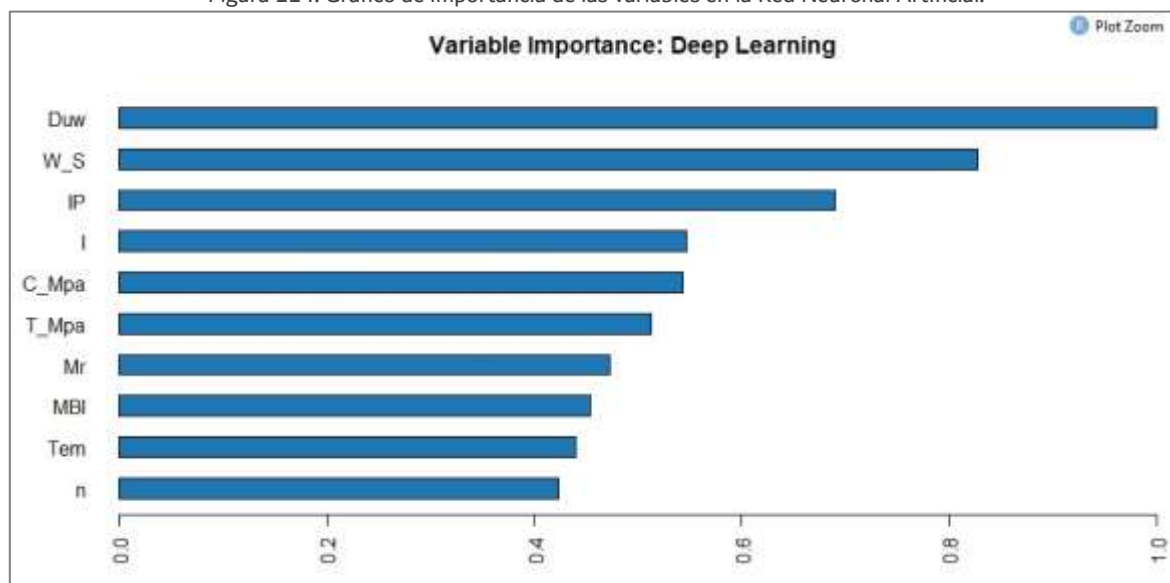
Capas	Neuronas	Tipo	L 1	L2	Tasa media	Tasa RMS	Peso RMS	Peso promedio
1	13	Input						
2	7	Rectifier	0	0	0.052231	0.034782	0.349803	-0.039003
3	7	Rectifier	0	0	0.030008	0.012901	0.540035	0.164049
4	1	Linear	0	0.035989	0.004578	0.002062	0.193112	-0.126123

De Al igual que *Neuralnet*, el paquete *H2O* identifica las variables con mayor importancia dentro del modelo. En este caso, la variable con mayor relevancia es el peso unitario seco (Duw).

Le siguen, en orden de importancia:

1. Contenido de humedad
2. Índice de plasticidad
3. Conductividad térmica
4. Resistencia a la compresión
5. Resistencia a la tracción indirecta
6. Módulo resiliente
7. Índice de metileno
8. Temperatura de curado

Figura 114. Gráfico de importancia de las variables en la Red Neuronal Artificial.



A continuación, en la Tabla 37 , se presentan con mayor detalle las magnitudes de importancia relativa, la importancia escalada y el porcentaje de equivalencia de cada una de las variables en la Red Neuronal Artificial.

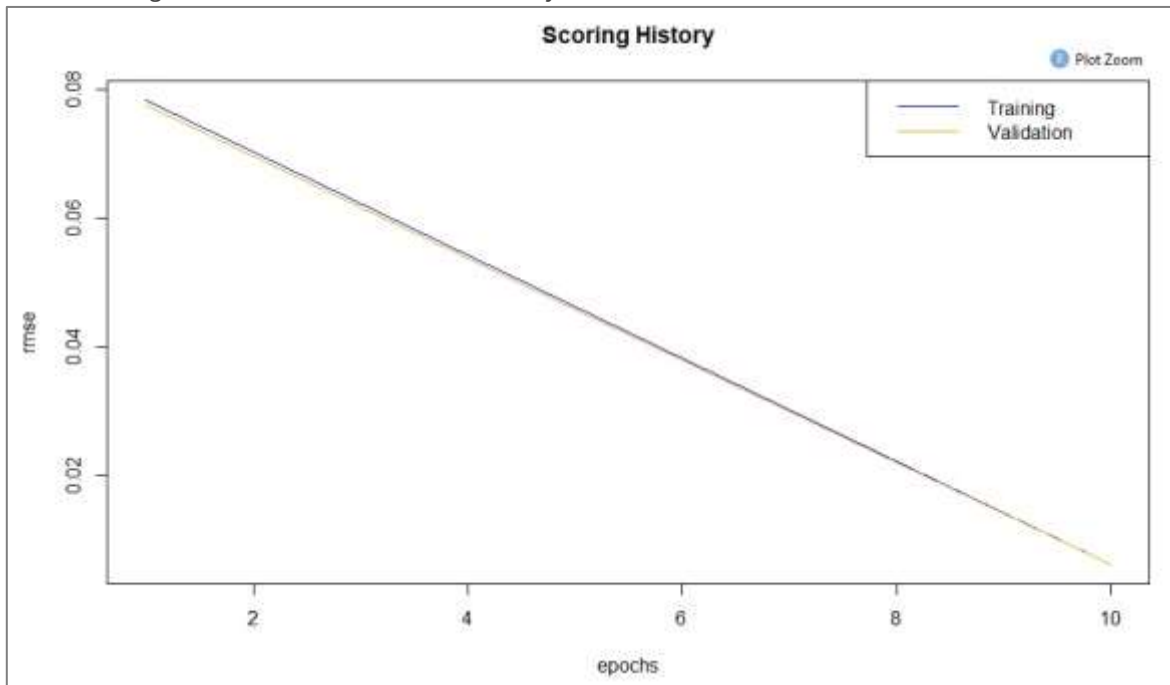
Tabla 37. Importancia de las variables en el modelo de Red Neuronal Artificial en H₂O.

Nivel	Variable	Importancia relativa	Importancia escalada	Porcentaje
1	Peso Unitario Seco (Duw)	1	1	14.9%
2	Contenido de agua (W_S)	0.827641	0.827641	12.3%
3	Índice de Plasticidad (IP)	0.689761	0.689761	10.3%
4	Conductividad térmica (I)	0.547053	0.547053	8.1%
5	Resistencia a Compresión (C_Mpa)	0.543341	0.543341	8.1%
6	Tracción indirecta (T_Mpa)	0.512894	0.512894	7.6%
7	Módulo Resiliente (Mr)	0.472863	0.472863	7.0%
8	Índice de azul de metileno (MBI)	0.45423	0.45423	6.8%
9	Temperatura de curado (Tem)	0.440274	0.440274	6.5%
10	Porosidad (n)	0.423514	0.423514	6.3%
11	Presión de cámara (Cp)	0.32691	0.32691	4.9%
12	Pérdidas por ignición (LOI)	0.277179	0.277179	4.1%
13	Esfuerzo desviador (Sd)	0.208789	0.208789	3.1%
Total:		6.724449	6.724449	100.0%

Una vez finalizada la etapa de entrenamiento y puesta a prueba del modelo, se calculan los valores predichos. En la Figura 115, se presentan los resultados del error cuadrático medio (RMS) en las iteraciones realizadas, tanto en la etapa de entrenamiento como en la de validación.

Los resultados indican que, a medida que aumenta el número de iteraciones, el margen de error se reduce. En cualquier caso, el error registrado es significativamente bajo (<0.05).

Figura 115. Resultados del entrenamiento y la validación del modelo de Red Neuronal Artificial.



4.4 COMPARACIÓN CON OTROS MODELOS

La investigación sobre predicciones y análisis de modelos matemáticos aplicados a mezclas de suelo-cemento ha mostrado un crecimiento constante. Tras la Primera Guerra Mundial, el desarrollo de la ingeniería geotécnica se ha basado en datos experimentales, modelados mediante diversos métodos para predecir rápidamente variables que, de otro modo, solo podrían obtenerse a través de ensayos de laboratorio costosos y complejos.

En la Tabla 38, se presentan algunos modelos lineales de predicción del módulo resiliente, los cuales se basan en iteraciones y correlaciones con datos obtenidos a partir de pruebas de resiliencia de suelos.

Tabla 38. Modelos de predicción de módulos resilientes.

Modelos Lineales (Lm)	Fuente
$M_R = K_1 * Pa * \left[\left(\frac{\sigma_3}{Pa} \right)^{K2} \right] * \left[\left(\frac{\sigma_d}{Pa} + 1 \right)^{K3} \right]$	[276]
$M_R = K_1 * (Sm^{K2})$	[277]
$M_R = K_1 * (\sigma_d^{K2})$	[277]
$M_R = K_1 * (\sigma_d^{K2}) * (\sigma_3^{K3})$	[278]
$M_R = K_1 * Pa * \left[\left(\frac{(Bulk\ Stress - 3K6)}{Pa} \right)^{K2} \right] * \left[\left(\frac{T_{oct}}{Pa} + K7 \right)^{K3} \right]$	[279]
$M_R = K_1 (\sigma_3)^{K2}$	[274]
$\log M_R = C_1 + C_2 + W_c + C_3 \times S$	[280]
$M_R = K_1 * Pa * \left[\left(\frac{\sigma_3}{Pa} \right)^{K2} \right]$	[281]
$M_R = K_0 \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3Pa} \right)^{K1} \left(\frac{\tau_{oct}}{\tau_{ref}} \right)^{K2}$	[282]
$M_R = K_1 \left(\frac{\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_1 \sigma_3}{\tau_{oct}} \right)^{K2}$	[283]
$M_R = A_0 + P_a + A_1 c + A_2 \times \sigma_d \tan \phi + A_3 \theta + A_4 \times PaMC + A_5 UC$	[284]
$M_R = 10 \left(a + \frac{b - a}{1 + \exp[\beta + K_2 \times (Wc - Wc_{opt})]} \right) \times K_1 Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{K2} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{K3}$	[285]
$M_R = K_1 Pa \left[\left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{K2} \right] * \left[\left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{K3} \right]$	[286]
$M_R = K_1 Pa \left[\left(\frac{(\sigma_b + 3K_4 \phi \theta)}{Pa} \right)^{K2} \right] * \left[\left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{K3} \right]$	[287]
$M_R = K_1 Pa \left(\frac{\theta_b}{Pa} \right)^{K2} \left(K_4 + \frac{\tau_{oct}}{Pa} \right)^{K3} + \alpha_1 u_m^{\beta_1}$	[288]

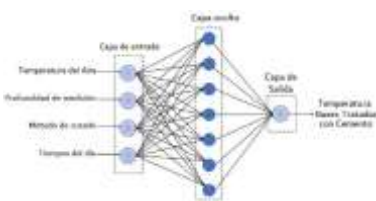
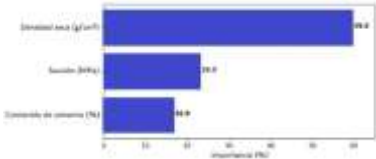
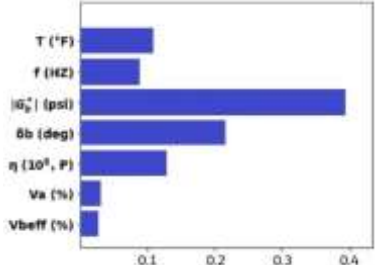
Lo que estas ecuaciones tienen en común es la necesidad de realizar la prueba de módulo resiliente en las muestras. Como se explicó en el diseño metodológico, el ensayo consiste en aplicar una serie de esfuerzos cíclicos sobre la muestra mientras esta se encuentra sometida a una presión de cámara. La norma de ensayo recomienda registrar únicamente las últimas cinco secuencias de carga, donde cada secuencia consta de 15 ciclos de carga.

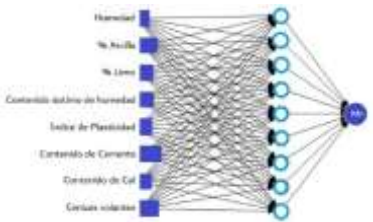
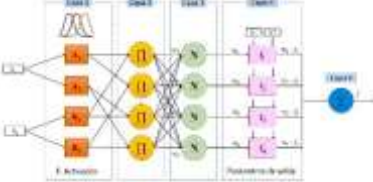
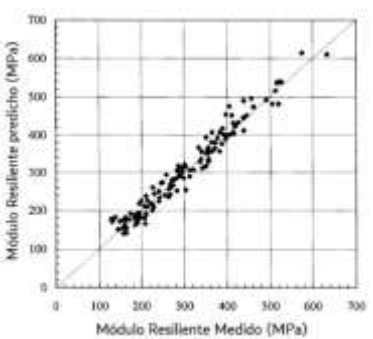
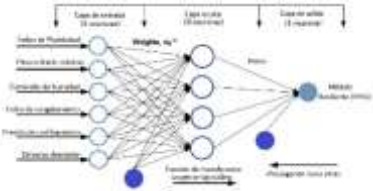
A partir de esta serie de datos, se facilita la iteración de constantes utilizadas en los modelos lineales presentados en la Tabla 38.

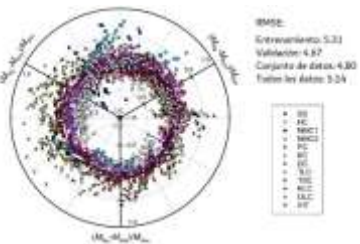
Desde el desarrollo de códigos para la modelación de redes neuronales artificiales, se han publicado diversos estudios que buscan predecir el módulo resiliente, incorporando nuevas variables influyentes en el proceso, que anteriormente no se habían considerado.

A continuación, se presenta un cuadro comparativo con los datos más relevantes de las Redes Neuronales Artificiales.

Tabla 39. Modelos de Redes Neuronales Artificiales que tienen el módulo resiliente como variable.

Fuente	Modelo	Variables de entrada	Variable de salida	Detalles del modelo
[289]		• Temperatura del aire • Profundidad de la medición • Método de curado • Hora del día	Temperatura de una base tratada con cemento.	Una capa oculta con 7 neuronas. MSE: 0.0044469 Predicho: Temperatura
[290]		• Densidad seca • Succión • Contenido de cemento	Compresión inconfiada de suelos	Una capa oculta con 10 neuronas, RMSE: 0.129
[260]		• Temperatura • Frecuencia • Gb • Viscosidad • Volumen de vacíos	Módulo dinámico de Mezclas asfálticas	RMSE:14.0367

[261]		• Humedad • %Arcilla • %Limo • Contenido óptimo de agua • Índice de plasticidad • Cemento • Cal • Cenizas volantes	Módulo Resiliente de suelo cemento	Una capa oculta con 8 neuronas, $R^2=0.97$
[262]		• Humedad • Densidad seca • Pasa 200 • Limo • Límite líquido • Índice de Plasticidad	$\ln(k)$, k_1 , k_2	Se predicen las constantes para el cálculo del Mr. Una celda oculta con 4 neuronas. $R^2:0.93$
[291]		• Esfuerzo desviador • Presión de cámara • Frecuencia • Ciclos	Módulo Resiliente de Balasto	Una capa oculta con 9 neuronas, $R^2=0.956$
[292]		• Coeficiente de uniformidad • Tamaño promedio de agregados • Peso unitario seco • Contenido de finos • Esfuerzo desviador • Presión de confinamiento	Modulo Resiliente de Agregados gruesos	Dos capas ocultas con 5 neuronas cada una, $MSE=0.017$
[293]		• Índice de plasticidad • Peso unitario máximo • Contenido de humedad • Ciclos de congelamiento • Presión de confinamiento • Esfuerzo desviador	Módulo resiliente (MPa)	Una capa oculta con 9 neuronas, $R^2=0.92$

[294]	 RMSE: Entrenamiento: 5.23 Validación: 4.87 Conjunto de datos: 4.80 Pruebas los datos: 5.24	• Densidad seca • Índice de plasticidad • Humedad • Número de ciclos • Esfuerzo desviador • Presión de cámara	Módulo Resiliente	Una capa oculta con 6 neuronas, $R^2=0.96$
-------	---	--	-------------------	--

Tras el análisis de los modelos revisados, se concluye que la mayoría presenta una arquitectura con una sola capa oculta, lo que en algunos casos puede prolongar el tiempo de entrenamiento. Una técnica común para la arquitectura de redes neuronales es elegir el número de neuronas ocultas igual a la mitad de las variables de entrada. Es decir, si el número de variables de entrada es 6, el número de neuronas ocultas debería ser 3. Sin embargo, en las redes neuronales presentadas en la Tabla 39, esta recomendación no fue aplicada, ya que en muchos casos el número de neuronas ocultas supera o iguala al número de neuronas de entrada.

Todos los indicadores de precisión, como el R^2 y el MSE, muestran resultados satisfactorios, lo que indica que las variables utilizadas tienen un impacto significativo y están estrechamente relacionadas con el módulo resiliente. En particular, las variables más recurrentes en la predicción del módulo resiliente en suelos granulares son el esfuerzo desviador y la presión de cámara, lo que sugiere su gran importancia en la modelación de esta variable respuesta.

Hasta ahora, no se habían considerado tantas variables de entrada en la modelación de una red neuronal para el diseño de mezclas de suelo-cemento. Es probable que esto se deba a la falta de datos o a caracterizaciones limitadas de las mezclas. Comparando la red neuronal artificial propuesta en esta investigación con otros modelos publicados y validados en diferentes contextos, se observa que, por primera vez, se incluyen 13 variables intervinientes en el diseño. Variables como el contenido de materia orgánica, el índice de azul de metileno, la conductividad térmica, el tipo de suelo y la densidad suelen correlacionarse con el índice de plasticidad. Sin embargo, la plasticidad de los suelos o residuos arcillosos no siempre depende únicamente de este índice, ya que existen suelos con alta plasticidad debido a su estructura química (como las montmorillonitas), pero también debido al contenido de materia orgánica.

Por otro lado, debido a limitaciones de infraestructura y los altos costos de los ensayos de laboratorio, la variable módulo resiliente en el diseño de pavimentos suele correlacionarse con ensayos de menor costo, como la resistencia a la compresión inconfiada, el penetrómetro dinámico de cono, el índice de plasticidad o el CBR. Sin embargo, en pocos estudios se ha correlacionado simultáneamente la

resistencia a la compresión, la tracción indirecta y el módulo resiliente bajo diferentes condiciones de presión de cámara y esfuerzos desviadores.

Las redes neuronales, al ser una rama de la inteligencia artificial, se comparan con la estructura y funcionamiento del cerebro humano para procesar información. A través de una serie de nodos interconectados, las redes reciben datos, los procesan y generan una salida, ajustándose de manera que aprenden y se adaptan a diferentes tipos de entradas. Esto permite identificar patrones en grandes volúmenes de datos y, al alimentar las redes con variables más específicas, los modelos logran predicciones más precisas.

5 CAPÍTULO IV: OJETIVOS ALCANZADOS, CONCLUSIONES, PRODUCCIÓN CIENTÍFICA Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se consolidan los objetivos alcanzados a lo largo de la investigación, así como las conclusiones generales derivadas del estudio experimental y el análisis de la información obtenida. Además, se presenta la producción científica generada durante el proceso de formación doctoral y se brindan recomendaciones para futuras investigaciones o réplicas que permitan dar continuidad al tema de estudio y su aplicabilidad en distintos contextos.

5.1 OBJETIVOS ALCANZADOS

Se identificó de manera precisa y cuantificable el impacto de la temperatura de curado en la resiliencia de los residuos marginales de excavación, construcción y demolición mezclados con cemento hidráulico. Los estudios se realizaron con materiales provenientes de la Mina La Fiscala de Bogotá y la Cantera de agregados T.S. Ingeniería.

Los resultados obtenidos a través de ensayos no destructivos, como conductividad térmica, monitoreo de temperatura y temperatura de curado, permitieron profundizar en el conocimiento del comportamiento físico y mecánico de los residuos arcillosos con cemento, ante la exposición a temperaturas altas y bajas. Se encontró una relación directa entre la temperatura de curado y las propiedades mecánicas, estableciendo las siguientes tasas de incremento por cada grado centígrado adicional:

- Resistencia a la compresión: +2.7%
- Resistencia a la tracción indirecta: +2.5%
- Módulo resiliente: +4.1%

Estos hallazgos demuestran que una mezcla de suelo-cemento curada a 10°C en un clima frío, con una resistencia de 2 MPa, puede alcanzar 2.81 MPa si se cura a 40°C, sin modificar la dosificación de la mezcla ni las propiedades de los materiales. Esto resalta la importancia de incluir la temperatura de curado como una variable fundamental en los diseños de pavimentos y la dosificación de mezclas de suelo-cemento.

Se realizó una caracterización geotécnica de tres tipos de residuos arcillosos, encontrando una correlación entre sus propiedades y su conductividad térmica. Se estableció que:

- A mayor contenido de materia orgánica, pérdidas por ignición, índice de plasticidad e índice de azul de metileno, mayor es la conductividad térmica del suelo.

- Existe una relación de multicolinealidad entre el índice de plasticidad y la composición química de los materiales.
- Mediante técnicas avanzadas (XRD, SEM, TGA y DSC), se identificó que los residuos con mayor contenido de materia orgánica contenían rastros de algas diatomeas, características de los depósitos lacustres de la Sabana de Bogotá.

Se determinó, además, que el calor liberado por la reacción exotérmica del suelo-cemento es proporcional a la conductividad térmica del residuo sin cemento. También, se encontró que las arcillas con alto contenido de caolinita y materia orgánica tienen mayor capacidad de absorber la temperatura ambiente.

Se analizaron muestras de suelo-cemento curadas en cuartos húmedos con temperaturas controladas de 40°C, 28°C y 10°C, evaluando su resistencia mediante los ensayos:

- Resistencia a la compresión (ASTM C1074-19)
- Resistencia a la tracción indirecta (ASTM C496M-17)
- Módulo resiliente (AASHTO T307-99)

Los resultados mostraron que las muestras expuestas a temperaturas de 10°C y 40°C absorben rápidamente la temperatura ambiente, afectando significativamente su comportamiento mecánico.

Se desarrolló una Red Neuronal Artificial (ANN) en R Studio, utilizando los paquetes Neuralnet y H2O, con el objetivo de modelar y predecir el contenido óptimo de cemento necesario para obtener un módulo resiliente óptimo en pavimentos.

- Se identificó que la conductividad térmica no es una variable de alta importancia, a diferencia de la temperatura de curado, que mostró una influencia significativa.
- Se comparó el modelo propuesto con otros estudios previos, encontrando que, por primera vez, se incorporaron 13 variables intervinientes en el diseño, tales como contenido de materia orgánica, índice de azul de metileno, porosidad, conductividad térmica y temperatura de curado.

5.2 CONCLUSIONES

5.2.1 Caracterización de residuos arcillosos para obras de infraestructura.

La construcción de infraestructura es una de las actividades con mayor impacto en el consumo de materiales naturales, debido a la alta demanda de minería de agregados pétreos, las emisiones de CO₂ en la producción de materiales para concreto y la baja adopción de construcciones sostenibles.

Dentro de la clasificación de los residuos de demolición, excavación y construcción, se pueden distinguir los residuos reutilizables y no reutilizables. Uno de los materiales con gran potencial, pero frecuentemente descartado, son las arcillas altamente compresibles, comúnmente categorizadas como residuos marginales debido a su:

- Inestabilidad volumétrica
- Alta absorción de agua
- Elevada plasticidad
- Baja resistencia mecánica

A pesar de estas limitaciones en ingeniería geotécnica y estructural, estos residuos tienen un gran valor en otras aplicaciones debido a su capacidad para:

- Intercambio catiónico
- Encapsulamiento de nanopartículas
- Adsorción de minerales

Los residuos arcillosos expansivos pueden aprovecharse en distintos sectores de la ingeniería, como:

- Material cementante complementario mediante la activación térmica de la caolinita.
- Material fino para mejorar la densidad y reducir la porosidad del hormigón.
- Adsorbente de contaminantes, gracias a su gran superficie específica y capacidad de intercambio iónico.
- Industria de la construcción y manufactura, donde su capacidad de intercalación molecular permite aplicaciones en:
 - Impresión 3D
 - Producción de fertilizantes
 - Purificación de aguas residuales con reactivos nocivos
 - Pigmentos, pinturas y cerámica blanca
 - Contenedores de almacenamiento de alimentos

A pesar de estos beneficios, solo el 0.4% de las publicaciones científicas consideran los residuos arcillosos como materiales reutilizables en el diseño de nuevos materiales. No obstante, sus

propiedades los convierten en un residuo con alto potencial, especialmente por su capacidad para encapsular otros minerales y su proceso de sinterización más económico en comparación con otros materiales de construcción.

5.2.2 Mezclas de residuos arcillosos con cemento hidráulico.

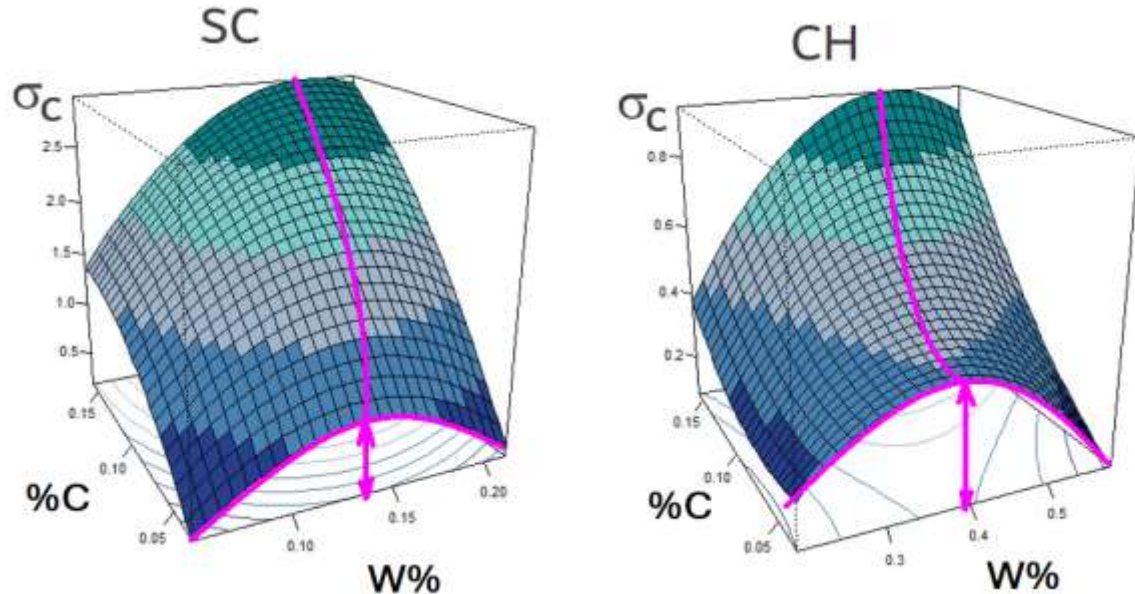
El análisis gráfico de la caracterización de los tres materiales empleados en esta investigación revela una variación significativa en la resistencia a la compresión, directamente relacionada con el índice de plasticidad del material. A pesar de que la metodología y normatividad vigente proponen unificar el diseño de mezclas con base en una resistencia definida o mediante parámetros estándar de contenido de cemento, los resultados muestran que la resistencia a la compresión varía significativamente según el índice de plasticidad, la cantidad de cemento y el contenido de agua en la mezcla.

La dispersión de los resultados es más pronunciada debido a las diferencias en la composición química y características físicas de los tres residuos utilizados. Dado que los materiales presentan variaciones considerables, es necesario aplicar transformaciones estadísticas para capturar con precisión las diferencias entre los materiales y desarrollar un modelo multivariado que represente correctamente las relaciones entre las variables. Sin embargo, cada vez que se replique un diseño de mezcla, se recomienda validar los resultados mediante pruebas experimentales de laboratorio para asegurar la precisión del modelo en distintas condiciones.

Las variables de mayor importancia en el modelo matemático para el diseño de una mezcla de suelo cemento incluyen el contenido de agua en la mezcla, el contenido de LOI del material, el índice de plasticidad, el contenido de cemento y la densidad de la mezcla. Durante la etapa de moldeo y fabricación, es fundamental prestar especial atención a la aplicación del contenido óptimo de humedad, ya que las superficies de respuesta para los tres materiales estudiados revelaron una concavidad más estrecha en aquellos con alta plasticidad y alto contenido de materia orgánica.

En la Figura 116 se observa que la contra flecha de la concavidad de la muestra arenosa es menor en comparación con la muestra más arcillosa. Además, la superficie en el eje de esfuerzos muestra una curvatura cóncava, lo que indica que los esfuerzos se mantienen elevados a pesar de las variaciones en el contenido de cemento. En contraste, en la muestra con mayor índice de plasticidad, la superficie adquiere una forma convexa, similar a una silla de montar, evidenciando una respuesta diferente a los cambios en la composición de la mezcla.

Figura 116. Diferencias en la concavidad de las superficies de respuesta de los modelos lineales para el diseño de la mezcla.



Esto demuestra que se debe tener especial cuidado en la dosificación de agua, ya que adicionar mayor contenido de cemento no sería suficiente para compensar las pérdidas en la resistencia. Durante la etapa constructiva, es fundamental considerar que si la dosificación de agua se altera debido al exceso de humedad del suelo, la lluvia o la deshidratación por altas temperaturas, la resistencia debe compensarse corrigiendo el contenido de cemento. Sin embargo, es importante recordar que un exceso de cemento puede generar una cantidad excesiva de etringita, lo que podría provocar microfisuración temprana y afectar la durabilidad de la mezcla.

El efecto del índice de plasticidad en las mezclas de suelo cemento puede explicar por qué las mezclas diseñadas en laboratorio a menudo muestran variaciones en la resistencia cuando se miden en el sitio. En el caso de los materiales arenosos, las pequeñas variaciones en el contenido de agua en la mezcla no afectan significativamente la resistencia. De hecho, como se observa en las abscisas de la superficie de respuesta SC de la Figura 116, el material arenoso requiere una dosis muy baja de humedad para alcanzar una resistencia óptima, lo que lo hace menos sensible a los cambios en el contenido de agua en comparación con materiales más arcillosos.

Sin embargo, para materiales cohesivos con alta plasticidad y alto contenido de materia orgánica, la resistencia solo se logra con dosis más altas de humedad, pero en un rango más estrecho de contenido óptimo de agua debido a su concavidad tan cerrada. Una mezcla con alto contenido de humedad tiende a ser cohesiva y viscosa, dificultando su manipulación y compactación, mientras que una mezcla con bajo contenido de agua puede volverse demasiado seca y volátil, comprometiendo su

integridad estructural. En ambos casos, la densidad y la resistencia se deterioran más rápidamente en comparación con los materiales arenosos o de baja plasticidad, lo que resalta la importancia de un control preciso del contenido de agua en la mezcla para garantizar un desempeño óptimo en campo.

En algunos casos, la variación de humedad en la mezcla se puede compensar corrigiendo el contenido de cemento, lo que garantiza que la resistencia del diseño se logre durante el proceso de construcción. Este ajuste permite mantener la integridad estructural de la mezcla y minimizar los efectos adversos de condiciones ambientales variables. Tanto el contenido de humedad como el contenido de cemento juegan un papel crucial en la resistencia final del material y su desempeño en obra. Estos factores se describen en las Ecuaciones 1, 2 y 3, que caracterizan el comportamiento de las superficies de respuesta para los tres materiales estudiados, permitiendo entender mejor la relación entre sus propiedades y optimizar su aplicación en proyectos de infraestructura.

5.2.3 Efecto de la temperatura de curado en las mezclas de residuos arcillosos con cemento hidráulico.

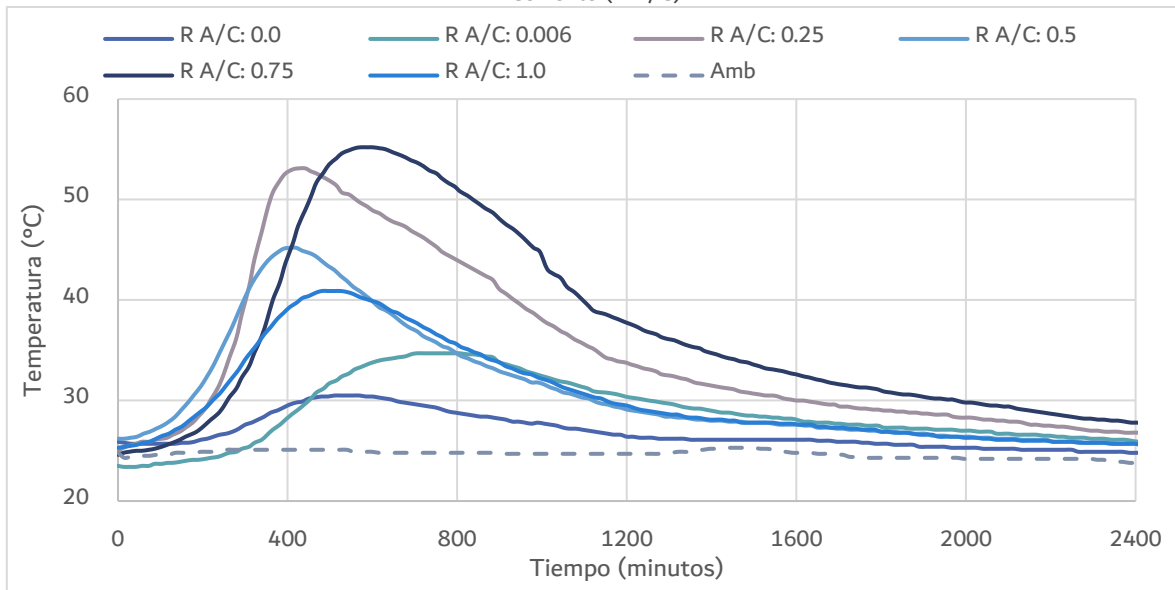
A diferencia de los concretos hidráulicos, las mezclas de suelo cemento presentan un desarrollo de temperaturas particular debido a que la liberación de energía por la reacción exotérmica del cemento hidráulico depende directamente del contenido de agua en la mezcla. Para confirmar la hipótesis planteada a partir de las pruebas experimentales y el monitoreo de temperaturas en condiciones semiadiabáticas, se realizaron ensayos similares utilizando el cemento hidráulico ART empleado en esta investigación, mezclado con agua en diferentes proporciones.

El ensayo se llevó a cabo en la misma cámara adiabática descrita en el título 3.3.5., con seis mezclas que presentaban relaciones agua/cemento de 0.0, 0.0062, 0.25, 0.5, 0.75 y 1.0, cuyos resultados se registraron y analizaron en la Figura 117.

Como se observa en la figura, el contenido de agua en la mezcla influye directamente en el desarrollo de temperaturas. La muestra con una relación agua/cemento de 0.75 registró un incremento de 30.6°C, mientras que la muestra con una relación A/C de 0.0 presentó un aumento de 5.7°C y la muestra sin agua mostró una variación de temperatura de apenas 1.5°C.

Siguiendo el mismo procedimiento empleado con las muestras de suelo cemento, se instaló una termocupla fuera de las cabinas de icopor, dentro de la cámara de curado completamente apagada. Aunque su propósito no era alterar la temperatura de las muestras con la temperatura ambiente, se llevó a cabo un monitoreo continuo para confirmar que esta se mantuviera constante.

Figura 117. Monitoreo de temperaturas de mezclas de cemento ART y agua en diferentes proporciones de Relación Agua Cemento (R A/C)

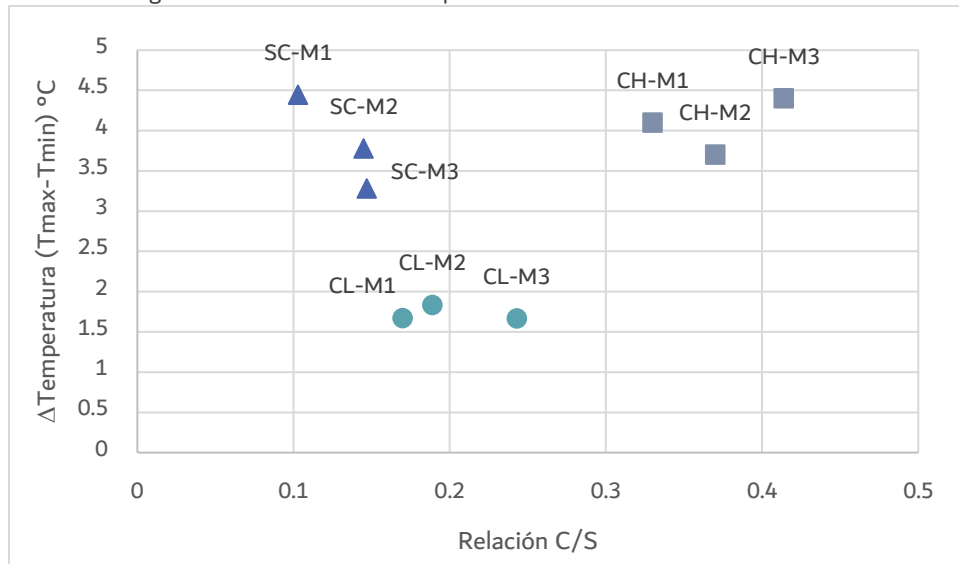


Comparada con la Figura 68, a pesar de que se trata del mismo cemento y la misma cabina, los incrementos de temperatura fueron significativamente menores. El mayor incremento registrado fue de 4.4°C para las muestras SC-M1 y CH-M3, mientras que el más bajo fue de 1.67°C para la mezcla CL-M3. Aunque se intentó establecer una correlación entre el incremento de temperatura y variables como el contenido de cemento, el contenido de agua y la relación agua/cemento, no se logró identificar una función satisfactoria que describiera el comportamiento.

En la Figura 118 se presenta la distribución de los resultados para cada tipo de suelo en función del contenido de cemento en la mezcla, expresado como un valor adimensional obtenido de la división entre la masa del cemento y la masa del suelo seco.

Esto sugiere que las muestras arenosas, debido a su alto contenido de sílice, favorecen la conducción térmica de la energía liberada por la hidratación del cemento, mientras que las muestras arcillosas de alta compresibilidad, por su mayor contenido de humedad en comparación con las demás, permiten una mayor hidratación del cemento, lo que facilita una ligera liberación de energía. En ambos casos, los valores de temperatura registrados son significativamente menores en comparación con la energía térmica liberada por el cemento sin mezclar con residuos arcillosos.

Figura 118. Incrementos de temperatura de las mezclas de suelo cemento



Este ejercicio complementario refuerza la hipótesis de que las mezclas de suelo cemento preparadas en condiciones secas, donde la humedad añadida es mínima y el asentamiento es nulo, presentan una hidratación inicial del cemento reducida. La alta capacidad de adsorción de las arcillas dificulta que el cemento alcance la etapa de disolución, lo que resulta en una liberación mínima de energía exotérmica. En estos casos, la resistencia inicial de la mezcla está más relacionada con la tixotropía de las arcillas, un fenómeno que implica la recuperación de resistencia tras el remoldeo de sus partículas.

No obstante con las difracciones y las micrografías SEM, se observó un desarrollo de hidróxido de calcio Ca(OH)_2 , gel Tobermorita y Portlandita confirmando la adherencia de la pasta en las partículas arcillosas, en las mezclas que fueron curadas en las cabinas a diferentes temperaturas. Se deduce entonces que durante la etapa 5 conocida como difusión, donde los iones de Ca^{2+} se desplazan a lugares de menor concentración, es la etapa que cobra mayor importancia en estas mezclas secas.

A diferencia de los concretos hidráulicos, la mezcla de suelo cemento no está completamente endurecida durante la etapa 5 (primeros días de edad) y la hidratación del cemento ocurre con el agua liberada por la desorción de la arcilla, esto se logra más fácilmente en temperaturas cálidas que en las temperaturas frías.

La Figura 78 ilustra claramente este comportamiento: las muestras con mayor plasticidad y, por ende, mayor contenido de humedad, presentan mayores variaciones de temperatura en climas fríos (10°C). En estos casos, el exceso de humedad en la mezcla dificulta la conducción del calor hacia el interior, lo que resulta en menores resistencias y módulos resilientes. En contraste, las muestras arenosas,

caracterizadas por un menor contenido de humedad y un mayor porcentaje de sílice, experimentan una mayor absorción de calor en cabinas curadas a 40°C.

Esto facilita la desorción del contenido arcilloso y la hidratación del cemento por difusión, lo que a su vez favorece el desarrollo de resistencias más altas y módulos resilientes superiores. Estos resultados resaltan la importancia de considerar la temperatura de curado y la composición del material en el diseño de mezclas de suelo cemento para garantizar un desempeño óptimo en distintas condiciones ambientales.

Este fenómeno indica que, después de los primeros 7 días de curado, las muestras experimentan una pérdida de masa y humedad, lo que sugiere que el agua inicialmente retenida por la arcilla es liberada progresivamente. Esta humedad liberada es aprovechada por el cemento hidráulico para su hidratación, lo que contribuye a la formación de hidróxido de calcio (Ca(OH)_2), como se evidencia en las micrografías SEM y en los análisis de difracción por rayos X.

La variabilidad de esta pérdida de humedad depende del tipo de suelo arcilloso y de la densidad de la muestra, lo que confirma la interacción entre la matriz arcillosa y el cemento durante el proceso de endurecimiento. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de considerar la capacidad de retención y liberación de agua de las arcillas en el diseño y curado de mezclas de suelo cemento, especialmente en entornos con diferentes condiciones de temperatura y humedad.

Estos hallazgos resaltan la importancia del control de la humedad durante el proceso de curado de las mezclas de suelo cemento. Si bien la humedad relativa dentro de las cabinas favorece una hidratación progresiva, su exceso puede generar deformaciones en mezclas altamente compresibles, como las CH, debido a su alto contenido de materia orgánica y elevada capacidad de absorción. La implementación de un recubrimiento de vinipel como medida de control permitió estandarizar el almacenamiento y minimizar la variabilidad en los resultados experimentales.

En un contexto constructivo, estos resultados sugieren que es fundamental evitar la exposición prolongada a ambientes con humedad excesiva, como niveles freáticos altos o lluvias continuas. Para mitigar estos efectos, se recomienda cubrir las capas de suelo cemento lo antes posible, ya sea mediante técnicas de impermeabilización o la aplicación de capas granulares que protejan la mezcla y aseguren una hidratación controlada sin comprometer su estabilidad y resistencia.

Estos resultados indican que la conductividad térmica de los residuos arcillosos está influenciada por múltiples factores, donde una mayor densidad seca favorece una mayor conducción térmica, mientras que un alto índice de plasticidad, humedad y contenido de materia orgánica reducen esta capacidad. En términos de hidratación del cemento, las arcillas de baja compresibilidad presentan una ventaja

significativa, ya que permiten una hidratación más controlada y gradual, con menor liberación de energía y reacciones exotérmicas reducidas. Esto sugiere que, en aplicaciones de suelo cemento, la selección de materiales con menor plasticidad y menor contenido de materia orgánica podría mejorar la estabilidad térmica y la durabilidad del material, favoreciendo un desarrollo más homogéneo de la resistencia mecánica a lo largo del tiempo.

Este comportamiento térmico se debe a las diferencias en la composición mineralógica y la porosidad de los materiales. Los materiales arenosos, ricos en cuarzo, tienen una mayor conductividad térmica y menor capacidad de retención de humedad, lo que les permite absorber y liberar calor más rápidamente en ambientes cálidos.

En contraste, las arcillas, debido a su estructura laminar y alta capacidad de adsorción de agua, almacenan más energía térmica en temperaturas más bajas e intermedias. Esto sugiere que la respuesta térmica de las mezclas de suelo cemento puede ser optimizada considerando la proporción de materiales arenosos y arcillosos según las condiciones climáticas del lugar donde serán utilizados.

Este hallazgo resalta la importancia de la temperatura de curado en el desarrollo de las propiedades mecánicas de las mezclas de suelo cemento. A temperaturas más elevadas, la hidratación del cemento se acelera, favoreciendo una ganancia temprana de resistencia y resiliencia, mientras que a temperaturas más bajas, la hidratación es más lenta, lo que puede derivar en una estructura interna con mayor porosidad y menor cohesión en los primeros días de curado.

Además de la temperatura, otras variables como el peso unitario seco, la resistencia a la compresión, la presión de la cámara y la porosidad juegan un papel fundamental en la determinación del módulo de resiliencia. Un mayor peso unitario seco y una mayor resistencia a la compresión suelen estar asociados a una menor porosidad y una mejor capacidad de recuperación del material frente a cargas aplicadas. Esto refuerza la necesidad de controlar adecuadamente las condiciones de curado y compactación para garantizar un desempeño óptimo en aplicaciones de infraestructura.

5.2.4 Modelación de redes neuronales artificiales para mezclas de residuos arcillosos con cemento hidráulico

Estos resultados indican que el uso de modelos de redes neuronales artificiales permite obtener predicciones precisas en el comportamiento de las mezclas de suelo cemento, incluso cuando intervienen múltiples variables. El modelo desarrollado con Neuralnet mostró un margen de error bajo, lo que sugiere que puede ser una herramienta confiable para la predicción del desempeño mecánico de estas mezclas en proyectos reales.

Sin embargo, la aplicación H2O demostró ser aún más eficiente y rápida, con un error cuadrático medio (MSE) de 9.89×10^{-6} , lo que lo convierte en una opción óptima para implementar modelos predictivos en estudios de ingeniería de materiales. Esta capacidad de predicción avanzada permite optimizar diseños de mezcla y reducir la variabilidad en obra, mejorando la calidad y durabilidad de las estructuras construidas con suelo cemento.

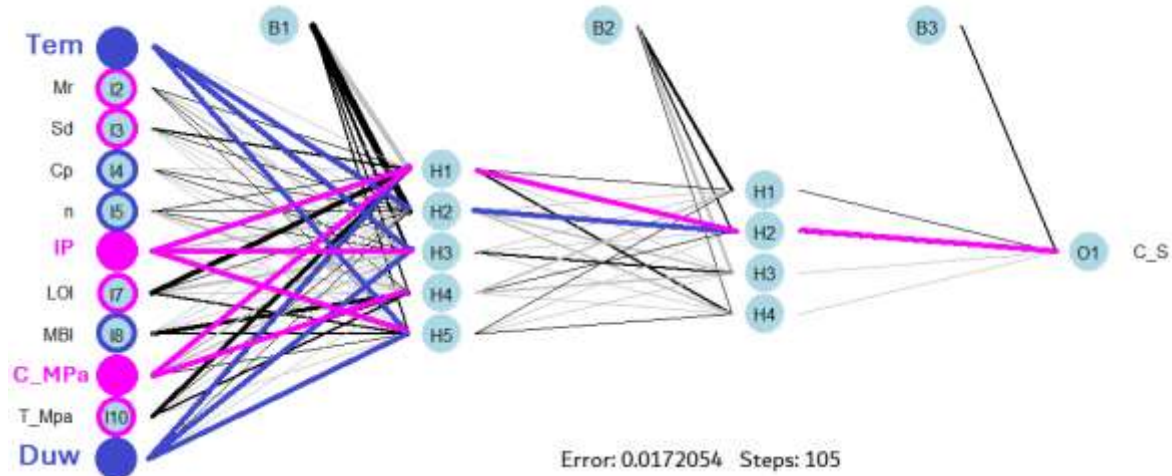
La modelación se llevó a cabo utilizando la variable de respuesta C_S (Contenido de cemento), dado que su aplicación está orientada al diseño de mezclas que incorporan residuos arcillosos con contenido de materia orgánica y que son sometidos a diferentes condiciones de curado. En este proceso, los valores de módulo de resiliencia y resistencia a la compresión se emplearon como datos de entrada fundamentales, asegurando que las mezclas cumplan con los requisitos establecidos en el diseño de pavimentos. De esta manera, el modelo permite ajustar de manera óptima la dosificación de cemento en función de las propiedades mecánicas requeridas, optimizando el desempeño y la durabilidad de las mezclas en condiciones reales de aplicación.

Al comparar los modelos de predicción desarrollados hasta ahora, se observa que ninguno de ellos ha considerado simultáneamente variables clave como la temperatura de curado, la conductividad térmica, la porosidad, el índice de plasticidad, el índice de azul de metileno, el módulo resiliente, la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción indirecta. A pesar de la complejidad del modelo propuesto y la cantidad de variables involucradas, los márgenes de error obtenidos son mínimos, y los coeficientes de determinación (R^2) superan el 98%, lo que garantiza un alto nivel de confiabilidad en las predicciones. Esto demuestra que el modelo es robusto y adecuado para su aplicación en el diseño de mezclas con residuos arcillosos, optimizando su desempeño en proyectos reales de construcción.

En la distribución de la red neuronal que se muestra en la Figura 119, se destacan las variables de entrada con mayor importancia en el modelo. Las variables señaladas en color magenta muestran una proporción positiva directa, siendo la resistencia a la compresión inconfiada en MPa y el índice de plasticidad (IP) las más relevantes. Esto coincide con su uso frecuente en modelos de predicción previos desarrollados por otros autores. No obstante, las neuronas de salida también están interconectadas con otras variables de menor importancia dentro del modelo, como la resistencia a la tracción indirecta—fundamental en pavimentos para evitar la microfisuración—, el contenido de materia orgánica en los suelos, el módulo de resiliencia y el esfuerzo desviador. Estas variables

complementarias permiten capturar mejor la complejidad del comportamiento de las mezclas de suelo-cemento, mejorando la precisión del modelo de predicción.

Figura 119. Red Neuronal Artificial con las variables de mayor importancia resaltadas



Por otro lado, las variables de entrada con mayor importancia que interactúan de manera inversa, con una proporción negativa en el modelo, son la temperatura de curado en °C y la densidad seca en Ton/m³. Estas variables están directamente conectadas con la porosidad de la muestra, la presión de cámara y el índice de azul de metileno.

La relación negativa sugiere que, a medida que aumenta la temperatura de curado o la densidad seca, pueden presentarse efectos adversos en la porosidad y en la respuesta mecánica del material, lo que resalta la importancia de un control preciso en el proceso de curado y compactación para optimizar el desempeño de las mezclas de suelo-cemento.

Las variables de entrada en las redes neuronales artificiales se interconectan a través de neuronas o nodos que reciben, procesan y generan respuestas en la neurona de salida. Estas redes, al formar parte de la inteligencia artificial, simulan la estructura y el funcionamiento del cerebro humano para procesar información de manera eficiente. Actualmente, existen diversas aplicaciones de las redes neuronales, desde motores de búsqueda y sistemas de seguridad hasta servicios avanzados como GPT-4, que emplean modelos transformadores de lenguaje para tareas como la generación de texto (ChatGPT), la creación de imágenes (DALL-E) y la síntesis de música (Riffusion).

En el ámbito de la ingeniería y la construcción, una de las tendencias más relevantes en redes neuronales profundas es la aplicación de patrones y predicción de respuestas en términos de

resistencia mecánica, así como el uso de redes especializadas en el procesamiento de secuencias de datos para analizar la evolución del comportamiento de materiales en distintas condiciones.

Es responsabilidad de los investigadores y desarrolladores enfrentar desafíos como el aprovechamiento de residuos marginales, la mitigación del impacto ambiental, los efectos del calentamiento global y la estabilidad de estructuras sostenibles. La integración de estos factores en el desarrollo de materiales y modelos predictivos es clave para crear sistemas que sean efectivos, confiables y equitativos, garantizando así un avance tecnológico alineado con los principios de sostenibilidad y resiliencia.

5.3 PRODUCCIÓN CIENTÍFICA

Durante el desarrollo de esta investigación, se ha participado en diversos eventos científicos y se han realizado múltiples publicaciones. A continuación, se presentan los medios de divulgación y los títulos de los trabajos publicados, de acuerdo con la clasificación establecida por Colciencias:

5.3.1 Participación en eventos científicos

151ª Reunión Anual y Exposición TMS 2022, en Las Vegas los Estados Unidos, modalidad remota. Artículo científico: “Effect of thermal conductivity on the mechanical behavior or marginal construction waste as a structural material for recycled pavements.” Idioma: inglés. Publicado en Actas complementarias de la 151.ª reunión y exposición anual de TMS 2022. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-92381-5> [295].

Expo Ingeniería 2022, Medellín Colombia. Título del documento: “Hybrid dust of construction and demolition waste in the compressive strength of hydraulic concrete mixtures.” Idioma: inglés. Poster, artículo y ponencia publicado en las memorias del evento Expo Ingeniería 2022 “Engineering for Transformation”, ISBN Digital: 978-628-95287-1-8, ISBN Impreso: 978-628-95287-2-5. <https://expoingenieria.edu.co/wp-content/uploads/2022/11/Libro-ExpoIngenieria-04.11.22.pdf>. Pág. 122-130 [296].

49th International Conference & Exposition on Advanced Ceramics & Composites. The American Ceramic Society 2025. Resumen: “(ICACC-PA004-2025) Recycling and circular economy with clay waste: trends and challenges.” Idioma: inglés. Poster y resumen publicado en las memorias del evento, pág. 93, https://ceramics.org/wp-content/uploads/2024/12/12.20.ICACC25_Abstracts-3.pdf, [297].

49th International Conference & Exposition on Advanced Ceramics & Composites. The American Ceramic Society 2025. (ICACC-PB062-2025) Effect of curing temperature on mixtures of clayey waste with hydraulic cement for geothermal pavements.” Idioma: inglés. Poster y resumen publicado en las memorias del evento, pág. 168, https://ceramics.org/wp-content/uploads/2024/12/12.20.ICACC25_Abstracts-3.pdf, [297].

5.3.2 Publicación científica

Hernández García, L.C.; Monteiro, S.N.; Lopera, H.A.C. Recycling ClayWaste from Excavation, Demolition, and Construction: Trends and Challenges. Sustainability 2024, 16, 6265. <https://doi.org/10.3390/su16146265> [298].

Hernández García, L.C.; Lopera, H.A.C. Effect of the Loss on Ignition on The Unconfined Compressive Strength of Residual Clays from Bogotá-Colombia Stabilized with Cement. Journal of Materials Research and Technology. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.11.081> [299].

Hernández García, L.C.; Valencia, J. V., Lopera, H.A.C., Modeling an Artificial Neural Network to Estimate Cement Consumption in Clayey Waste-Cement Mixtures Based on Curing Temperature, Mechanical Strength, and Resilient Modulus. Journal Construction & Building Materials. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140376> [300].

5.4 RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones, se hacen las siguientes recomendaciones:

- ❖ Se recomienda seleccionar un único método de preparación y compactación de muestras de suelo-cemento. Aunque las normas técnicas establecen distintos procedimientos según la prueba (Proctor Modificado, compresión y módulo resiliente), utilizar un solo método evita la variabilidad en los resultados debido a diferencias en la relación de vacíos y porosidad. Es importante considerar que el peso unitario varía con la dosificación de cemento, ya que a mayor contenido de cemento, se requiere una mayor humedad óptima. Además, la humedad debe calcularse antes de adicionar el cemento, pues, una vez realizada la mezcla, parte del agua es retenida y transformada en la estructura del suelo-cemento.
- ❖ Cada método estadístico requiere la validación de sus supuestos para confirmar la validez del modelo de predicción. Sin embargo, aunque los supuestos cumplan con $\alpha > 0.05$, es recomendable realizar pruebas experimentales para validar el modelo. En esta investigación, por ejemplo, se validó el modelo lineal de diseño de la mezcla no solo verificando los supuestos de normalidad y especificación, entre otros, sino también mediante la elaboración de muestras sometidas a pruebas de compresión, tracción y módulo resiliente. Dado que se trata de mezclas híbridas con características especiales, se recomienda realizar varias réplicas experimentales para garantizar la confiabilidad de cualquier modelo de predicción estadística.
- ❖ Como se demuestra en esta investigación, la variación de la temperatura afecta significativamente la resistencia y la resiliencia de las mezclas de suelo cemento. Por esta razón, cada vez que se realicen pruebas, diseños y validaciones experimentales, se debe registrar la temperatura a la que fue curada la muestra. Si la dosificación de la mezcla fue diseñada en laboratorio conforme a la norma técnica de ensayo, es necesario realizar una corrección considerando la temperatura en la que será instalada la mezcla en campo. Dado que las condiciones de laboratorio no replican exactamente las condiciones reales, es previsible que los resultados en el pavimento sean diferentes, lo que hace indispensable esta adaptación.
- ❖ La principal motivación de esta investigación ha sido el desarrollo de pavimentos geotérmicos. Diversas publicaciones han demostrado que, dentro de la estructura del pavimento, la capa con mayor temperatura coincide con la capa de mejoramiento de subrasante. Por esta razón, se recomienda continuar con investigaciones en estructuras reales, mediante la implementación de tramos de prueba de pavimentos geotérmicos. Esto permitirá articular los modelos desarrollados en laboratorio con los datos obtenidos en

campo a escala real, validando y ajustando las predicciones para su aplicación efectiva en proyectos de infraestructura vial.

- ❖ Se recomienda realizar estudios futuros para validar el uso de la medición de la conductividad térmica como un método indirecto para estimar el porcentaje de compactación del pavimento en campo. En esta investigación, la conductividad térmica se midió con un equipo portátil, registrando una estrecha relación con la densidad del suelo, y a su vez, con el porcentaje de compactación. Confirmar esta relación en condiciones reales permitiría desarrollar una herramienta práctica y eficiente para evaluar la calidad de la compactación sin necesidad de métodos invasivos o destructivos.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] World Road Association, *Review of practices using marginal and secondary materials in Rural and Industrial Areas Technical*. France: Committee D.4 Rural Roads and Earthworks 2019R43EN, 2019. [Online]. Available: <http://www.piar.org>
- [2] M. Sarkar-Swaigood, "covid-19 Revela la necesidad Urgente de una Infraestructura Resiliente," Naciones Unidas.
- [3] United Nations ESCAP, "The Economic and Social Commission for Asia and the," 2019.
- [4] H. M. Nuwagaba, "Opportunities for Affordable Construction in Uganda using Locally Available Materials," 2020.
- [5] FHWA, "User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction," FHWA-RD-97-148. [Online]. Available: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/about.cfm>
- [6] Mit Concrete Sustainability HUB, "Life Cycle Thinking-Pavements," 2018.
- [7] Association Cement Portland, "Soil Cement," Soil Cement. [Online]. Available: <https://www.cement.org/cement-concrete-applications/paving/soil-cement>
- [8] DPN, "Conpes 3991," Bogotá D. C., Apr. 2020.
- [9] M. Shehata, A. Ahmed, and S. Easa, "Use of factory-waste shingles and cement kiln dust to enhance the performance of soil used in road works," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2009, 2009, doi: 10.1155/2009/143750.
- [10] P. Ghadir and N. Ranjbar, "Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement," *Constr Build Mater*, vol. 188, pp. 361–371, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.207.
- [11] S. Lv *et al.*, "Unified approach to characterize the strength of cement stabilized macadam subjected to different loading modes," *Constr Build Mater*, vol. 265, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120143.
- [12] S. Pongsivasathit, S. Horpibulsuk, and S. Piyaphipat, "Assessment of mechanical properties of cement stabilized soils," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 11, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.cscm.2019.e00301.
- [13] G. o. Kang, T. Tsuchida, and Y. sang Kim, "Strength and stiffness of cement-treated marine dredged clay at various curing stages," *Constr Build Mater*, vol. 132, pp. 71–84, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.124.
- [14] Y. Cai, L. Xu, W. Liu, Y. Shang, N. Su, and D. Feng, "Field Test Study on the dynamic response of the cement-improved expansive soil subgrade of a heavy-haul railway,"

Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 128, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.soildyn.2019.105878.

- [15] PIARC C2.5, *Promouvoir L'Entretien durable des Réseaux de Routes Rurales*. Comité technique 2.5 , 2019.
- [16] ACI, *Report on soil cement (ACI 230.1R-09)*. American Concrete Institute, 2009.
- [17] J. Gross and W. Adaska, "Guide to Cement-Stabilized Subgrade Soils," Washington, DC, May 2020.
- [18] Z. Liu, B. Lou, D. M. Barbieri, A. Sha, T. Ye, and Y. Li, "Effects of pre-curing treatment and chemical accelerators on Portland cement mortars at low temperature (5 °C)," *Constr Build Mater*, vol. 240, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117893.
- [19] T. Boubekur, K. Ezziane, and E. H. Kadri, "Estimation of mortars compressive strength at different curing temperature by the maturity method," *Comput Chem Eng*, vol. 71, pp. 299–307, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.084.
- [20] H. Ju, G. M. Filz, R. A. Green, and M. Mauldon, "Influence of Curing Temperature on Strength of Cement-treated Soil and Investigation of Optimum Mix Design for the Wet Method of Deep Mixing," 2018.
- [21] V. Langlois and X. Jia, "Acoustic probing of elastic behavior and damage in weakly cemented granular media," *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys*, vol. 89, no. 2, Feb. 2014, doi: 10.1103/PhysRevE.89.023206.
- [22] L. C. Hernández G. and N. F. Lizarazo, "Resilient module soil-cement prediction based on setting temperature," *Ingenieria e Investigacion*, vol. 40, no. 2, pp. 1–7, 2020, doi: 10.15446/ing.investig.v40n2.83120.
- [23] M. Benaicha, Y. Burtschell, and A. H. Alaoui, "Prediction of compressive strength at early age of concrete - Application of maturity," *Journal of Building Engineering*, vol. 6, pp. 119–125, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.jobe.2016.03.003.
- [24] P. Kulanthaivel, B. Soundara, S. Velmurugan, and V. Naveenraj, "Experimental investigation on stabilization of clay soil using nano-materials and white cement," *Mater Today Proc*, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.107.
- [25] A. Kuryłowicz-Cudowska, K. Wilde, and J. Chróścielewski, "Prediction of cast-in-place concrete strength of the extradosed bridge deck based on temperature monitoring and numerical simulations," *Constr Build Mater*, vol. 254, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119224.
- [26] ASTM International, "Standard Practice for Design of Stabilization of Soil and Soil-Like Materials with Self-Cementing Fly Ash 1," 2018, doi: 10.1520/D7762-18.

- [27] L. L. Zeng, X. Bian, L. Zhao, Y. J. Wang, and Z. S. Hong, "Effect of phosphogypsum on physiochemical and mechanical behaviour of cement stabilized dredged soil from Fuzhou, China," *Geomechanics for Energy and the Environment*, vol. 25, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.gete.2020.100195.
- [28] K. E. Clare and A. E. Pollard, "The Effect Of Curing Temperature On the Compressive Strenght Of Soil-Cement Mixtures," *Géotechnique*, 1954. doi: <https://doi.org/10.1680/geot.1954.4.3.97>.
- [29] J. James, "Sugarcane press mud modification of expansive soil stabilized at optimum lime content: Strength, mineralogy and microstructural investigation," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 12, no. 2, pp. 395–402, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.jrmge.2019.10.005.
- [30] S. R. Kaniraj and V. G. Havanagi, "Compressive strength of cement stabilized fly ash-soil mixtures," 1999.
- [31] E. B. Moreira, J. A. Baldovino, J. L. Rose, and R. Luis dos Santos Izzo, "Effects of porosity, dry unit weight, cement content and void/cement ratio on unconfined compressive strength of roof tile waste-silty soil mixtures," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 369–378, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.jrmge.2018.04.015.
- [32] S. Rahman, M. Jamal Khattak, B. Adhikari, and S. Adhikari, "Discrete Element Modeling of Bonded Soil Mixtures Under Uniaxial Compression and Indirect Tension Test," *Transportation Geotechnics*, p. 100438, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.trgeo.2020.100438.
- [33] G. o. Kang, T. Tsuchida, and Y. sang Kim, "Strength and stiffness of cement-treated marine dredged clay at various curing stages," *Constr Build Mater*, vol. 132, pp. 71–84, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.124.
- [34] A. Mohammed, W. Mahmood, and K. Ghafor, "TGA, rheological properties with maximum shear stress and compressive strength of cement-based grout modified with polycarboxylate polymers," *Constr Build Mater*, vol. 235, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117534.
- [35] A. Mardani-Aghabaglou, I. Kalipcilar, G. Inan Sezer, A. Sezer, and S. Altun, "Freeze-thaw resistance and chloride-ion penetration of cement-stabilized clay exposed to sulfate attack," *Appl Clay Sci*, vol. 115, pp. 179–188, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.clay.2015.07.041.
- [36] L. Wang, X. Li, Y. Cheng, Y. Zhang, and X. Bai, "Effects of coal-bearing metakaolin on the compressive strength and permeability of cemented silty soil and mechanisms,"

- Constr Build Mater*, vol. 186, pp. 174–181, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.057.
- [37] G. V. Praveen, P. Kurre, and T. Chandrabai, “Improvement of California Bearing Ratio (CBR) value of Steel Fiber reinforced Cement modified Marginal Soil for pavement subgrade admixed with Fly Ash,” *Mater Today Proc*, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.814.
- [38] Y. Kehinde Ariye, K. Abdulmalik, and A. Olarenwaju Adigun, “Soil-Cement Stabilization Using Papalanto to Sagamu Road in Ogun State, Nigeria as Case Study,” *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*, vol. 9, no. 6, pp. 27–35, 2020, doi: 10.9790/1813-0906022735.
- [39] K. H. Mamatha and S. V. Dinesh, “Resilient modulus of black cotton soil,” *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 10, no. 2, pp. 171–184, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.ijprt.2017.01.008.
- [40] P. Jitsangiam, K. Nusit, S. Likitlersuang, and J. Kodikara, “Using Damage Evaluation to Assess the Fatigue Behaviour of Cement-Treated Base Material from Laboratory and Full-Scale Performance Tests,” *Transportation Geotechnics*, p. 100440, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.trgeo.2020.100440.
- [41] S. Li and B. A. Sc, “EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF USING DEEP MIXING METHOD TO STABILISE PROBLEMATIC CLAYS IN ONTARIO,” 2017.
- [42] G. Kalankamary P., “Shrinkage Characteristics of Soil-Cement Mixtures,” 1968.
- [43] O. Aduvire, “DRENAJE ACIDO DE MINA,” Madrid, 2006.
- [44] M. Fall, J. C. Célestin, M. Pokharel, and M. Touré, “A contribution to understanding the effects of curing temperature on the mechanical properties of mine cemented tailings backfill,” *Eng Geol*, vol. 114, no. 3–4, pp. 397–413, Aug. 2010, doi: 10.1016/j.enggeo.2010.05.016.
- [45] K. S. Oh and T. H. Kim, “Dependence of the material properties of lightweight cemented soil on the curing temperature,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 26, no. 7, 2014, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000940.
- [46] N. C. Consoli, C. G. da Rocha, and C. Silvani, “Effect of curing temperature on the strength of sand, coal fly ash, and lime blends,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 26, no. 8, 2014, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001011.
- [47] R. J. Zhang, Y. T. Lu, T. S. Tan, K. K. Phoon, and A. M. Santoso, “Long-term effect of curing temperature on the strength behavior of cement-stabilized clay,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 140, no. 8, 2014, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001144.

- [48] United Nations, "Resolution approved by the General Assembly on September 25, 2015," *A/RES/70/1*, pp. 1–40, 2015.
- [49] United Nations, "A/RES/78/160 Ciencia, tecnología e innovación para el desarrollo sostenible 2/14," 2009.
- [50] PIARC, "Review of Practices Using Marginal and Secondary Materials in Rural and Industrial Areas," *Comité Técnico AIPCR Geotecnia y carreteras sin pavimentar*, 2019.
- [51] S. Mohammed, "Processing, effect and reactivity assessment of artificial pozzolans obtained from clays and clay wastes: A review," Jun. 01, 2017, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.078.
- [52] M. Rodríguez, J. Bussi, and M. Andrea De León, "Application of pillared raw clay-base catalysts and natural solar radiation for water decontamination by the photo-Fenton process," *Sep Purif Technol*, vol. 259, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.seppur.2020.118167.
- [53] Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., "Gestión Integral de RCD," *Secretaría de Ambiente*, pp. 1–45, 2015.
- [54] ASTM International, "D4318 – 17'117'1 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils 1," *ASTM International*, 2018, doi: 10.1520/D4318-17E01.
- [55] S. D. A. Selvasofia *et al.*, "Study on the mechanical properties of the nanoconcrete using nano-TiO₂ and nanoclay," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2021, pp. 1319–1325. doi: 10.1016/j.matpr.2021.08.242.
- [56] A. Gil *et al.*, "A review of organic-inorganic hybrid clay based adsorbents for contaminants removal: Synthesis, perspectives and applications," Oct. 01, 2021, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.jece.2021.105808.
- [57] S. Papatzani, "Effect of nanosilica and montmorillonite nanoclay particles on cement hydration and microstructure," 2016, *Maney Publishing*. doi: 10.1179/1743284715Y.0000000067.
- [58] A. Luciano, L. Cutaia, P. Altamura, and E. Penalvo, "Critical issues hindering a widespread construction and demolition waste (CDW) recycling practice in EU countries and actions to undertake: The stakeholder's perspective," *Sustain Chem Pharm*, vol. 29, p. 100745, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.scp.2022.100745.
- [59] C. T. Johnston, "Clay mineral–water interactions," in *Developments in Clay Science*, vol. 9, Elsevier B.V., 2018, pp. 89–124. doi: 10.1016/B978-0-08-102432-4.00004-4.
- [60] J. M. Moreno-Maroto and J. Alonso-Azcárate, "What is clay? A new definition of 'clay' based on plasticity and its impact on the most widespread soil classification systems," *Appl Clay Sci*, vol. 161, pp. 57–63, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.clay.2018.04.011.

- [61] N. B. Singh, "Clays and Clay Minerals in the Construction Industry," Mar. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/min12030301.
- [62] M. I. Carretero and M. Pozo, "Clay and non-clay minerals in the pharmaceutical industry. Part I. Excipients and medical applications," *Appl Clay Sci*, vol. 46, no. 1, pp. 73–80, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.clay.2009.07.017.
- [63] X. Yang, G. Wei, P. Wu, P. Liu, X. Liang, and W. Chu, "Controlling oxygen vacancies of CoMn₂O₄ by loading on planar and tubular clay minerals and its application for boosted PMS activation," *J Hazard Mater*, vol. 436, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.129060.
- [64] L. Fang, L. Wang, T. Zhou, L. Liu, J. Zhou, and M. Li, "Preparation and characterization of Fe,Co,Si-pillared montmorillonites with aminosilanes as silicon pillars precursor," *Appl Clay Sci*, vol. 141, pp. 88–94, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.clay.2017.02.006.
- [65] H. Najafi, S. Farajfaed, S. Zolgharnian, S. H. Mosavi Mirak, N. Asasian-Kolur, and S. Sharifian, "A comprehensive study on modified-pillared clays as an adsorbent in wastewater treatment processes," Mar. 01, 2021, *Institution of Chemical Engineers*. doi: 10.1016/j.psep.2020.09.028.
- [66] M. Asgari, G. Vitale, and U. Sundararaj, "Synthesis and characterization of a novel nickel pillared–clay catalyst: In-situ carbon nanotube–clay hybrid nanofiller from Ni-PILC," *Appl Clay Sci*, vol. 205, May 2021, doi: 10.1016/j.clay.2021.106064.
- [67] G. Habert *et al.*, "Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries," Nov. 01, 2020, *Springer Nature*. doi: 10.1038/s43017-020-0093-3.
- [68] B. Massoumi Nejad, S. Enferadi, and R. Andrew, "A comprehensive analysis of process-related CO₂ emissions from Iran's cement industry," *Cleaner Environmental Systems*, vol. 16, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.cesys.2024.100251.
- [69] J. Lehne and F. Preston, *Making Concrete Change Innovation in Low-carbon Cement and Concrete*, Cambridge. Japan: The Royal Institute of International Affairs, 2018. [Online]. Available: www.chathamhouse.org
- [70] M. F. Junaid *et al.*, "Lightweight concrete from a perspective of sustainable reuse of waste byproducts," Feb. 14, 2022, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126061.
- [71] B. Zhang, W. Ahmad, A. Ahmad, F. Aslam, and P. Joyklad, "A scientometric analysis approach to analyze the present research on recycled aggregate concrete," Apr. 01, 2022, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.jobbe.2021.103679.

- [72] M. Galetakis and A. Soutana, "A review on the utilisation of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector," Jan. 15, 2016, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.204.
- [73] S. De Carvalho Gomes, J. L. Zhou, W. Li, and G. Long, "Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review," Jun. 01, 2019, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.resconrec.2019.02.032.
- [74] S. Ray, M. Haque, T. Ahmed, A. F. Mita, M. H. Saikat, and M. M. Alom, "Predicting the strength of concrete made with stone dust and nylon fiber using artificial neural network," *Heliyon*, vol. 8, no. 3, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e09129.
- [75] L. Likes, A. Markandeya, M. M. Haider, D. Bollinger, J. S. McCloy, and S. Nassiri, "Recycled concrete and brick powders as supplements to Portland cement for more sustainable concrete," *J Clean Prod*, vol. 364, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132651.
- [76] A. E. Al-Salami, M. S. Morsy, S. Taha, and H. Shoukry, "Physico-mechanical characteristics of blended white cement pastes containing thermally activated ultrafine nano clays," *Constr Build Mater*, vol. 47, pp. 138–145, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.011.
- [77] E. Mikyskova, B. Dousova, P. Mikysek, M. Lhotka, and D. Kolousek, "Equilibrium, kinetic and thermodynamic study of Pb²⁺ removal from aqueous solution by waste brick dust," *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*, vol. 634, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.colsurfa.2021.127939.
- [78] A. D'Elia, D. Pinto, G. Eramo, L. C. Giannossa, G. Ventruti, and R. Laviano, "Effects of processing on the mineralogy and solubility of carbonate-rich clays for alkaline activation purpose: mechanical, thermal activation in red/ox atmosphere and their combination," *Appl Clay Sci*, vol. 152, pp. 9–21, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.clay.2017.11.036.
- [79] V. A. A. España, B. Sarkar, B. Biswas, R. Rusmin, and R. Naidu, "Environmental applications of thermally modified and acid activated clay minerals: Current status of the art," *Environ Technol Innov*, vol. 13, pp. 383–397, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.eti.2016.11.005.
- [80] E. Padilla-Ortega, N. Medellín-Castillo, and A. Robledo-Cabrera, "Comparative study of the effect of structural arrangement of clays in the thermal activation: Evaluation of their adsorption capacity to remove Cd(II)," *J Environ Chem Eng*, vol. 8, no. 4, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.jece.2020.103850.

- [81] L. G. Li, Z. H. Lin, G. M. Chen, and A. K. H. Kwan, "Reutilizing clay brick dust as paste substitution to produce environment-friendly durable mortar," *J Clean Prod*, vol. 274, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122787.
- [82] S. Hchemi, M. Khattab, and H. Benzetta, "The effects of recycled brick and water/cement ratios on the physical and mechanical performance of recycled aggregates concrete," *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 7, no. 4, p. 270, Aug. 2022, doi: 10.1007/s41062-022-00868-y.
- [83] Y. Sun *et al.*, "Development of a novel eco-efficient LC2 conceptual cement based ultra-high performance concrete (UHPC) incorporating limestone powder and calcined clay tailings: Design and performances," *J Clean Prod*, vol. 315, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128236.
- [84] D. Sinkhonde, R. O. Onchiri, W. O. Oyawa, and J. N. Mwero, "Response surface methodology-based optimisation of cost and compressive strength of rubberised concrete incorporating burnt clay brick powder," *Heliyon*, vol. 7, no. 12, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e08565.
- [85] D. Sinkhonde, R. O. Onchiri, W. O. Oyawa, and J. N. Mwero, "A study on mechanical properties of rubberised concrete containing burnt clay powder," *Heliyon*, vol. 8, no. 6, p. e09614, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e09614.
- [86] A. Mitrović and M. Zdujić, "Preparation of pozzolanic addition by mechanical treatment of kaolin clay," *Int J Miner Process*, vol. 132, pp. 59–66, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.minpro.2014.09.004.
- [87] A. M. Mansour and M. I. Al Biajawi, "The effect of the addition of metakaolin on the fresh and hardened properties of blended cement products: A review," *Mater Today Proc*, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.06.521.
- [88] S. W. M. Supit and M. Olivia, "Compressive strength and sulfate resistance of metakaolin-based geopolymers mortar with different ratio of alkaline activator," *Mater Today Proc*, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.06.514.
- [89] L. Kaur, "Mixed influence of steel fiber (SF) and metakaolin (MK) incorporation on mechanical properties of concrete," *Mater Today Proc*, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.06.014.
- [90] G. Chand, A. Kumar, and S. Ram, "Comparative study of metakaolin, pumice powder and silica fume in producing treated sustainable recycled coarse aggregate concrete by adopting two-stage mixing," *Clean Eng Technol*, vol. 9, p. 100528, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.clet.2022.100528.

- [91] R. Li, L. Lei, and J. Plank, "Impact of metakaolin content and fineness on the behavior of calcined clay blended cements admixed with HPEG PCE superplasticizer," *Cem Concr Compos*, vol. 133, p. 104654, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104654.
- [92] S. Bright Singh and M. Murugan, "Effect of metakaolin on the properties of pervious concrete," *Constr Build Mater*, vol. 346, p. 128476, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128476.
- [93] E. Obeng, H. M. K. Essandoh, K. Akodwaa-Boadi, T. S. Taylor, I. Kusi, and E. Appiah-Effah, "Recycled clay bricks and palm kernel shell as constructed wetland substrate for wastewater treatment: An engineered closed circuit circular economy approach," *Environ Technol Innov*, vol. 32, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.eti.2023.103324.
- [94] S. Nigéus, C. Maurice, and J. Lindblom, "Hydrogeological Properties of Till Amended with Green Liquor Dregs (GLD): Recycling of an Industrial Residue for Reclamation of Acid Generating Mine Sites," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 41, no. 6, pp. 3625–3639, Aug. 2023, doi: 10.1007/s10706-023-02477-7.
- [95] M. P. Belioka, G. Markozanne, K. Chrissopoulou, and D. S. Achilias, "Advanced Plastic Waste Recycling—The Effect of Clay on the Morphological and Thermal Behavior of Recycled PET/PLA Sustainable Blends," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 14, Jul. 2023, doi: 10.3390/polym15143145.
- [96] M. D. Nguyen *et al.*, "Investigation on the suitability of aluminium-based water treatment sludge as a sustainable soil replacement for road construction," *Transportation Engineering*, vol. 12, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.treng.2023.100175.
- [97] M. Ahmadi *et al.*, "Effects of melt-state shear homogenization on catalytic pyrolysis of mixed plastic waste for feedstock recycling," *Materials Today Sustainability*, vol. 22, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.mtsust.2023.100343.
- [98] G. T. M. Xavier, A. L. Urzedo, R. S. Nunes, P. S. Fadini, and W. A. Carvalho, "Incorporation of clay-based adsorbent into polyvinylidene fluoride membrane for enhanced phosphorus capture in aqueous solution," *Resour Conserv Recycl*, vol. 190, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.resconrec.2023.106867.
- [99] M. L. Bôto, S. M. Dias, R. D. Crespo, A. P. Mucha, and C. M. R. Almeida, "Removing chemical and biological pollutants from swine wastewater through constructed wetlands aiming reclaimed water reuse," *J Environ Manage*, vol. 326, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116642.
- [100] H. T. T. Dang, L. T. N. Pham, T. T. Pham, H. X. Nguyen, N. T. H. Tran, and K. M. Nguyen, "Effect of biowaste and construction waste additives on mechanical dewaterability of

- lake sediment for brick production,” *J Air Waste Manage Assoc*, vol. 73, no. 8, pp. 625–637, 2023, doi: 10.1080/10962247.2023.2228265.
- [101] M. Dubale, M. V. Vasić, G. Goel, A. Kalamdhad, and L. B. Singh, “Utilization of Construction and Demolition Mix Waste in the Fired Brick Production: The Impact on Mechanical Properties,” *Materials*, vol. 16, no. 1, Jan. 2023, doi: 10.3390/ma16010262.
- [102] P. Gallo Stampino *et al*, “Can TEMPO-Oxidized Cellulose Nanofibers Be Used as Additives in Bio-Based Building Materials? A Preliminary Study on Earth Plasters,” *Materials*, vol. 16, no. 1, Jan. 2023, doi: 10.3390/ma16010074.
- [103] C. J. Cobo-Ceacero *et al*, “Effect of the addition of organic wastes (cork powder, nut shell, coffee grounds and paper sludge) in clays to obtain expanded lightweight aggregates,” *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, vol. 62, no. 1, pp. 88–105, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.bsecv.2022.02.007.
- [104] ASTM, “C1272-21 Standard Specification for Heavy Vehicular Paving Brick,” *ASTM International*, pp. 1–4, 2021, doi: 10.1520/C1272-21.
- [105] ASTM, “C62-17 Standard Specification for Building Brick (Solid Masonry Units Made From Clay or Shale),” *ASTM International*, pp. 1–4, 2017, doi: 10.1520/C0062-17.
- [106] V. Lesovik, A. Volodchenko, R. Fediuk, Y. H. Mugahed Amran, and R. Timokhin, “Enhancing performances of clay masonry materials based on nanosize mine waste,” *Constr Build Mater*, vol. 269, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121333.
- [107] F. I. Aneke and C. Shabangu, “Green-efficient masonry bricks produced from scrap plastic waste and foundry sand,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 14, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00515.
- [108] J. A. De La Casa, I. Romero, J. Jiménez, and E. Castro, “Fired clay masonry units production incorporating two-phase olive mill waste (alperujo),” *Ceram Int*, vol. 38, no. 6, pp. 5027–5037, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.ceramint.2012.03.003.
- [109] H. Ulugöl *et al*, “Mechanical and microstructural characterization of geopolymers from assorted construction and demolition waste-based masonry and glass,” *J Clean Prod*, vol. 280, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124358.
- [110] O. Gencel, S. M. S. Kazmi, M. J. Munir, M. Sutcu, E. Erdogmus, and A. Yaras, “Feasibility of using clay-free bricks manufactured from water treatment sludge, glass, and marble wastes: An exploratory study,” *Constr Build Mater*, vol. 298, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123843.
- [111] D. Dodoo-Arhin *et al*, “Fabrication and Characterisation of Ghanaian Bauxite Red Mud-Clay Composite Bricks for Construction Applications,” *American Journal of M*

- aterials Science*, vol. 2013, no. 5, pp. 110–119, 2013, doi: 10.5923/j.materials.20130305.02.
- [112] Y. Chen *et al.*, “Effect of printing parameters on interlayer bond strength of 3D printed limestone-calcined clay-based cementitious materials: An experimental and numerical study,” *Constr Build Mater*, vol. 262, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120094.
- [113] Y. Chen *et al.*, “Effect of printing parameters on interlayer bond strength of 3D printed limestone-calcined clay-based cementitious materials: An experimental and numerical study,” *Constr Build Mater*, vol. 262, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120094.
- [114] C. F. Revelo and H. A. Colorado, “3D printing of kaolinite clay with small additions of lime, fly ash and talc ceramic powders,” *Processing and Application of Ceramics*, vol. 13, no. 3, pp. 287–299, 2019, doi: 10.2298/PAC1903287R.
- [115] Y. Chen, S. He, Y. Zhang, Z. Wan, O. Çopuroğlu, and E. Schlangen, “3D printing of calcined clay-limestone-based cementitious materials,” *Cem Concr Res*, vol. 149, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.cemconres.2021.106553.
- [116] E. Ordoñez, S. Neves Monteiro, and H. A. Colorado, “Valorization of a hazardous waste with 3D-printing: Combination of kaolin clay and electric arc furnace dust from the steel making industry,” *Mater Des*, vol. 217, May 2022, doi: 10.1016/j.matdes.2022.110617.
- [117] G. O. Ihekwe, J. N. Shondo, K. I. Orisekeh, G. M. Kalu-Uka, I. C. Nwuzor, and A. P. Onwualu, “Characterization of certain Nigerian clay minerals for water purification and other industrial applications,” *Heliyon*, vol. 6, no. 4, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03783.
- [118] F. V. Adams, A. Peter, I. V. Joseph, O. P. Sylvester, and A. F. Mulaba-Bafubandi, “Purification of crude oil contaminated water using fly ash/clay,” *Journal of Water Process Engineering*, vol. 30, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.jwpe.2017.08.009.
- [119] K. Brown *et al.*, “Polyvinyl alcohol-montmorillonite composites for water purification: Analysis of clay mineral cation exchange and composite particle synthesis,” *Polyhedron*, vol. 205, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.poly.2021.115297.
- [120] S. Nir *et al.*, “Water purification from perchlorate by a micelle-clay complex: Laboratory and pilot experiments,” *Appl Clay Sci*, vol. 114, pp. 151–156, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.clay.2015.05.021.
- [121] J. M. Gatica, D. M. Gómez, S. Harti, and H. Vidal, “Clay honeycomb monoliths for water purification: Modulating methylene blue adsorption through controlled activation via

- natural coal templating,” *Appl Surf Sci*, vol. 277, pp. 242–248, Jul. 2013, doi: 10.1016/j.apsusc.2013.04.034.
- [122] Ş. S. Seçilmiş, D. Koçak Yanık, S. Fadiloğlu, and F. Göğüş, “A comparative study on performance of industrial and microwave techniques for sunflower oil bleaching process,” *Food Chem*, vol. 365, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.foodchem.2021.130488.
- [123] D. Zhang *et al.*, “Liquefied dimethyl ether based multi-stage extraction for high efficient oil recovery from spent bleaching clay,” *Waste Management*, vol. 136, pp. 204–212, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2021.09.033.
- [124] Z. Wan *et al.*, “Co-pyrolysis of lignin and spent bleaching clay: Insight into the catalytic characteristic and hydrogen supply of spent bleaching clay,” *J Anal Appl Pyrolysis*, vol. 163, May 2022, doi: 10.1016/j.jaap.2022.105491.
- [125] N. Sapawe and M. Farhan Hanafi, “Analysis of the pyrolysis products from spent bleaching clay,” 2018. [Online]. Available: www.sciencedirect.comwww.materialstoday.com/proceedings
- [126] S. T. Khankhasaeva and S. V. Badmaeva, “Removal of p-aminobenzenesulfanilamide from water solutions by catalytic photo-oxidation over Fe-pillared clay,” *Water Res*, vol. 185, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.watres.2020.116212.
- [127] G. G. Haciosmanoğlu, C. Mejías, J. Martín, J. L. Santos, I. Aparicio, and E. Alonso, “Antibiotic adsorption by natural and modified clay minerals as designer adsorbents for wastewater treatment: A comprehensive review,” Sep. 01, 2022, *Academic Press*. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115397.
- [128] M. A. Vicente, A. Gil, and F. Bergaya, “Pillared clays and clay minerals,” in *Developments in Clay Science*, vol. 5, Elsevier B.V., 2013, pp. 523–557. doi: 10.1016/B978-0-08-098258-8.00017-1.
- [129] T. Chauhan *et al.*, “Synthesis, characterization, and challenges faced during the preparation of zirconium pillared clays,” *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 15, no. 4, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.arabjc.2022.103706.
- [130] A. Gil and M. A. Vicente, “Progress and perspectives on pillared clays applied in energetic and environmental remediation processes,” Feb. 01, 2020, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.cogsc.2019.12.004.
- [131] S. M. Reimbaeva, B. K. Massalimova, and M. S. Kalmakhanova, “New pillared clays prepared from different deposits of Kazakhstan,” in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2020, pp. 607–610. doi: 10.1016/j.matpr.2020.07.532.
- [132] H. Najafi, S. Farajfaed, S. Zolgharnian, S. H. Mosavi Mirak, N. Asasian-Kolur, and S. Sharifian, “A comprehensive study on modified-pillared clays as an adsorbent in

wastewater treatment processes,” Mar. 01, 2021, *Institution of Chemical Engineers*. doi: 10.1016/j.psep.2020.09.028.

- [133] Y. Chen *et al.*, “Positron annihilation study of chitosan and its derived carbon/pillared montmorillonite clay stabilized Pd species nanocomposites,” *Polym Test*, vol. 114, p. 107689, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.polymertesting.2022.107689.
- [134] M. Chauhan, V. K. Saini, and S. Suthar, “Enhancement in selective adsorption and removal efficiency of natural clay by intercalation of Zr-pillars into its layered nanostructure,” *J Clean Prod*, vol. 258, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120686.
- [135] R. P. Santos and R. Tubino, “Potential evaluation of the use of construction and demolition waste (CDW) in the recovery of degraded soils by mining in Brazil,” *Resources, Conservation and Recycling Advances*, vol. 12, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.rcradv.2021.200060.
- [136] R. Lord and R. Sakrabani, “Ten-year legacy of organic carbon in non-agricultural (brownfield) soils restored using green waste compost exceeds 4 per mille per annum: Benefits and trade-offs of a circular economy approach,” *Science of the Total Environment*, vol. 686, pp. 1057–1068, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.174.
- [137] P. K. Dubey *et al.*, “Animal manures and plant residue-based amendments for sustainable rice-wheat production and soil fertility improvement in eastern Uttar Pradesh, North India,” *Ecol Eng*, vol. 177, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.ecoleng.2022.106551.
- [138] H. Soinne *et al.*, “Are there environmental or agricultural benefits in using forest residue biochar in boreal agricultural clay soil?,” *Science of the Total Environment*, vol. 731, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138955.
- [139] J. Dong and J. Zhang, “Maya blue pigments derived from clay minerals,” in *Nanomaterials from Clay Minerals: A New Approach to Green Functional Materials*, Elsevier, 2019, pp. 627–661. doi: 10.1016/B978-0-12-814533-3.00013-2.
- [140] J. Jiang, T. Ayaz, Z. Jiang, and M. Lei, “Green remediation of heavy metal polluted water and soil using clay minerals: A review,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing Ltd, Jan. 2021. doi: 10.1088/1755-1315/632/5/052079.
- [141] A. M. Carrillo, C. M. Urruchurto, Carriazo J. G., Moreno R. A., and Molina R. A., “Structural and textural characterization of a Colombian Halloysite,” *Mexican Journal of Chemical Engineering*, vol. 13, no. 2, pp. 563–570, 2014.

- [142] X. Yang, J. Cai, L. Chen, X. Cao, H. Liu, and M. Liu, "Green detergent made of halloysite nanotubes," *Chemical Engineering Journal*, vol. 425, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.cej.2021.130623.
- [143] E. Akbarinezhad, M. Ebrahimi, F. Sharif, and A. Ghanbarzadeh, "Evaluating protection performance of zinc rich epoxy paints modified with polyaniline and polyaniline-clay nanocomposite," *Prog Org Coat*, vol. 77, no. 8, pp. 1299–1308, 2014, doi: 10.1016/j.porgcoat.2014.04.009.
- [144] M. M. S. Lopes *et al.*, "Optimization of performance of sustainable paints using granite waste through the variation of particle size and pH," *J Clean Prod*, vol. 326, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129418.
- [145] D. M. G. A. Tressmann *et al.*, "Research into the use of marble waste as mineral filler in soil pigment-based paints and as an active pigment in waterborne paints," *Constr Build Mater*, vol. 241, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117976.
- [146] M. M. Salgado Lopes *et al.*, "Influence of the incorporation of granite waste on the hiding power and abrasion resistance of soil pigment-based paints," *Constr Build Mater*, vol. 205, pp. 463–474, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.046.
- [147] D. Cheikh, H. Majdoub, and M. Darder, "An overview of clay-polymer nanocomposites containing bioactive compounds for food packaging applications," Jan. 01, 2022, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.clay.2021.106335.
- [148] M. R. Mohaseb Karimlou, M. Rezvani Tavakol, and M. Yarmohammad Tooski, "Experimental study of the effect of clay nanoparticles on the strength of hybrid sandwich panels under quasi-static loading," *Aerosp Sci Technol*, vol. 121, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.ast.2021.107313.
- [149] T. J. Gutiérrez, A. G. Ponce, and V. A. Alvarez, "Nano-clays from natural and modified montmorillonite with and without added blueberry extract for active and intelligent food nanopackaging materials," *Mater Chem Phys*, vol. 194, pp. 283–292, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.matchemphys.2017.03.052.
- [150] S. Maisanaba *et al.*, "Toxicological assessment of two silane-modified clay minerals with potential use as food contact materials in human hepatoma cells and Salmonella typhimurium strains," *Appl Clay Sci*, vol. 150, pp. 98–105, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.clay.2017.09.018.
- [151] X. Wu *et al.*, "Geochemical evidence reveals a long-distance trade of white pottery in Neolithic China 5,000 years ago," *J Archaeol Sci Rep*, vol. 44, p. 103533, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.jasrep.2022.103533.

- [152] T. Bahtli and Y. Erdem, "The use of foundry waste sand from investment casting in the production of porcelain tiles," *Ceram Int*, 2022, doi: 10.1016/j.ceramint.2022.06.100.
- [153] S. Conte, C. Zanelli, C. Molinari, G. Guarini, and M. Dondi, "Glassy wastes as feldspar substitutes in porcelain stoneware tiles: Thermal behaviour and effect on sintering process," *Mater Chem Phys*, vol. 256, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.matchemphys.2020.123613.
- [154] I. V. de Sousa, L. J. Jaramillo Nieves, A. G. Dal-Bó, and A. M. Bernardin, "Valorization of porcelain tile polishing residue in the production of cellular ceramics," *Clean Eng Technol*, vol. 6, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.clet.2021.100381.
- [155] B. Nascimento de Souza, M. Dal Bó, D. Hotza, and M. C. Fredel, "Chemical modification of porcelain tile surface to optimize flexural strength and Weibull modulus through the ion exchange process," *Journal of Building Engineering*, vol. 56, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.jobbe.2022.104735.
- [156] B. Tarhan, M. Tarhan, and T. Aydın, "Reusing sanitaryware waste products in glazed porcelain tile production," *Ceram Int*, vol. 43, no. 3, pp. 3107–3112, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.ceramint.2016.11.123.
- [157] L. Li, T. Jiang, B. Chen, M. Zhou, and C. Chen, "Overall utilization of vanadium–titanium magnetite tailings to prepare lightweight foam ceramics," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 139, pp. 305–314, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.psep.2020.04.034.
- [158] Y. Lu, W. Wang, J. Xu, J. Ding, Q. Wang, and A. Wang, "Solid-phase oxalic acid leaching of natural red palygorskite-rich clay: A solvent-free way to change color and properties," *Appl Clay Sci*, vol. 198, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.clay.2020.105848.
- [159] T. Engel and P. Reid, *Introducción a la Fisicoquímica: Termodinámica*, 1st ed., vol. 1. México: Pearson Educación, 2007.
- [160] B. Wolfgang and G. D. Westfall, *Física para ingenierías y ciencias*, 2nd ed. McGraw-Hill Interamericana, 2014.
- [161] S. Bhattacharjee, *Termodinámica*. México: Pearson Educación, 2016.
- [162] A. Kuryłowicz-Cudowska, K. Wilde, and J. Chróścielewski, "Prediction of cast-in-place concrete strength of the extradosed bridge deck based on temperature monitoring and numerical simulations," *Constr Build Mater*, vol. 254, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119224.
- [163] A. Tatar, S. Mohammadi, A. Soleymanzadeh, and S. Kord, "Predictive mixing law models of rock thermal conductivity: Applicability analysis," *J Pet Sci Eng*, p. 107965, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.petrol.2020.107965.

- [164] K. C. Rolle, *Termodinámica*, Sexta., vol. 1. México: Pearson Educación, 2006.
- [165] 360 en Concreto, “Calorimetría: Método de control de la ganancia de Resistencia del concreto,” Argos. [Online]. Available: <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/calorimetria-metodo-de-control>
- [166] ASTM International, *Standard Test Method for Measurement of Heat of Hydration of Hydraulic Cementitious Materials Using Isothermal Conduction Calorimetry 1*, C1702-17th ed. 2017. doi: 10.1520/C1702-17.
- [167] Icontec, “NTC 3756 Procedimiento para estimar la Resistencia del concreto por el método de la madurez,” pp. 1–18, 2018.
- [168] ASTM International, “C150/C150M – 22 Standard Specification for Portland Cement 1,” *ASTM*, 2022, doi: 10.1520/C0150_C0150M-22.
- [169] ASTM International, “C1157/C1157 M Standard Performance Specification for Hydraulic Cement 1,” *ASTM*, 2023, doi: 10.1520/C1157_C1157M-23.
- [170] FHWA, “Curing Concrete Paving Mixtures,” Nov. 2018.
- [171] Fhwa, “Tech Brief Internal Curing for Concrete Pavements,” 2016.
- [172] Q. Xu, J. Hu, J. M. Ruiz, K. Wang, and Z. Ge, “Isothermal calorimetry tests and modeling of cement hydration parameters,” *Thermochim Acta*, vol. 499, no. 1–2, pp. 91–99, Feb. 2010, doi: 10.1016/j.tca.2009.11.007.
- [173] ASTM International, “C1702 Standard Test Method for Measurement of Heat of Hydration of Hydraulic Cementitious Materials Using Isothermal Conduction Calorimetry,” *ASTM*, 2023, doi: 10.1520/C1702-23.
- [174] P. C. Taylor *et al.*, “Identifying Incompatible Combinations of Concrete Materials:- Volume II-Test Protocol,” *Federal Highway Administration*, 2006.
- [175] M. Bortoletto *et al.*, “New insights on understanding the Portland cement hydration using electrical impedance spectroscopy,” *Constr Build Mater*, vol. 407, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133566.
- [176] H. Shao, Y. Lin, Z. Li, S. Tang, and G. Ge, “Study the impedance spectroscopy of early-age cement paste hydration process using Electrodeless impedance analyzer (EIA),” *Constr Build Mater*, vol. 368, p. 130439, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130439.
- [177] J. M. Cruz, I. C. Fita, L. Soriano, J. Payá, and M. V. Borrachero, “The use of electrical impedance spectroscopy for monitoring the hydration products of Portland cement mortars with high percentage of pozzolans,” *Cem Concr Res*, vol. 50, pp. 51–61, 2013, doi: 10.1016/j.cemconres.2013.03.019.

- [178] Q. Liu *et al.*, “Effects of varied building solid wastes, particle sizes and substitution ratios on the performance and impedance spectrum of recycled fine aggregate mortar and the feasibility of developing a prediction method,” *Journal of Building Engineering*, p. 108310, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.jobbe.2023.108310.
- [179] Y. Wang, W. Xiao, C. Dai, J. Wang, and F. Pan, “Enhanced corrosion resistance of Mg alloy embedded in Cl--containing Portland cement with the formation of CaCO₃-coated Mg(Al)O passive film via one-step pulse electrodeposition,” *Corros Sci*, vol. 227, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.corsci.2023.111751.
- [180] S.-J. Feng and H. Chen, “Fractal thermal conductivity of unsaturated soils considering pore heterogeneity,” *J Hydrol (Amst)*, vol. 628, p. 130514, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.130514.
- [181] L. Liu, H. He, M. Dyck, and J. Lv, “Modeling thermal conductivity of clays: A review and evaluation of 28 predictive models,” *Eng Geol*, vol. 288, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.enggeo.2021.106107.
- [182] Michael. Frankel, *Facilities site piping systems handbook*, 1st ed., vol. 1. McGraw-Hill Educación, LLC, 2012.
- [183] L. Zhang, A. Gustavsen, B. P. Jelle, L. Yang, T. Gao, and Y. Wang, “Thermal conductivity of cement stabilized earth blocks,” *Constr Build Mater*, vol. 151, pp. 504–511, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.047.
- [184] USDA and NRCS, “Claves para la Taxonomía de Suelos Décima segunda Edición, 2014 Servicio de Conservación de Recursos Naturales,” New Jersey, 2014.
- [185] B. Ghorbani, A. Arulrajah, G. Narsilio, S. Horpibulsuk, and M. Leong, “Resilient moduli of demolition wastes in geothermal pavements: Experimental testing and ANFIS modelling,” *Transportation Geotechnics*, vol. 29, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.trgeo.2021.100592.
- [186] B. Ghorbani, A. Arulrajah, G. Narsilio, S. Horpibulsuk, and M. Win Bo, “Thermal and mechanical properties of demolition wastes in geothermal pavements by experimental and machine learning techniques,” *Constr Build Mater*, vol. 280, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122499.
- [187] F. Molaei and H. Siavoshi, “Molecular dynamics studies of thermal conductivity and mechanical properties of single crystalline α -quartz,” *Solid State Commun*, vol. 320, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.ssc.2020.114020.
- [188] L. Liu, H. He, M. Dyck, and J. Lv, “Modeling thermal conductivity of clays: A review and evaluation of 28 predictive models,” *Eng Geol*, vol. 288, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.enggeo.2021.106107.

- [189] Y. Kido, S. Nishimoto, H. Hayashi, and H. Hashimoto, "Effects of curing temperatures on the strength of cement-treated peat," *Civil Engineering Research Institute for Cold Region*, 2009.
- [190] K. Fang and M. Fall, "Effects of curing temperature on shear behaviour of cemented paste backfill-rock interface," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 112, pp. 184–192, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.ijrmms.2018.10.024.
- [191] M. Esmaili and H. Khajehei, "Mechanical behavior of embankments overlying on loose subgrade stabilized by deep mixed columns," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 8, no. 5, pp. 651–659, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.jrmge.2016.02.006.
- [192] A. Ghirian and M. Fall, "Coupled thermo-hydro-mechanical-chemical behaviour of cemented paste backfill in column experiments. Part II: Mechanical, chemical and microstructural processes and characteristics," *Eng Geol*, vol. 170, pp. 11–23, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.enggeo.2013.12.004.
- [193] A. Ardah, Q. Chen, and M. Abu-Farsakh, "Evaluating the performance of very weak subgrade soils treated/stabilized with cementitious materials for sustainable pavements," *Transportation Geotechnics*, vol. 11, pp. 107–119, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.trgeo.2017.05.002.
- [194] S. Mogili, H. Mudavath, K. K. Gonavaram, and Y. Paluri, "Strength and resilient behavior of lime modified pond ash as pavement layer," *Mater Today Proc*, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.168.
- [195] J. M. Lizarazo Marriaga, "Modelación Térmica de Concretos," American Concrete Institute Seccional Colombiana, Colombia, Jun. 10, 2021. Accessed: Jun. 13, 2021. [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=ZnDDqZ_8D-w
- [196] T. Tokoro, T. Ishikawa, S. Shirai, and T. Nakamura, "Estimation methods for thermal conductivity of sandy soil with electrical characteristics," *Soils and Foundations*, vol. 56, no. 5, pp. 927–936, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.sandf.2016.08.016.
- [197] S. Lines, D. J. Williams, and S. A. Galindo-Torres, "Determination of Thermal Conductivity of Soil Using Standard Cone Penetration Test," in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2017, pp. 172–178. doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.036.
- [198] X. Yu, Y. Zhang, N. Deng, H. Ma, and S. Dong, "Thermal response test for ground source heat pump based on constant temperature and heat-flux methods," *Appl Therm Eng*, vol. 93, pp. 678–682, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.10.007.

- [199] R. Borinaga-Treviño, J. Norambuena-Contreras, and D. Castro-Fresno, "How to correct the ambient temperature influence on the thermal response test results," *Appl Therm Eng*, vol. 82, pp. 39–47, May 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.02.050.
- [200] Y. Motamedi, N. Makasis, X. Gu, G. A. Narsilio, A. Arulrajah, and S. Horpibulsuk, "Investigating the thermal behaviour of geothermal pavements using Thermal Response Test (TRT)," *Transportation Geotechnics*, vol. 29, p. 100576, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.trgeo.2021.100576.
- [201] A. Girod Calonje, "Tipos de Geotermia," Blog. Accessed: Jun. 06, 2021. [Online]. Available: girodgeotermia.com/cuando-la-geotermia-es-la-unica-opcion/
- [202] E. Mkrtchyan, "Scientists will again discuss problems and prospects for development of geothermal energy in Armenia," *ARM INFO*, República de Armenia, Jun. 02, 2021. Accessed: Jun. 06, 2021. [Online]. Available: https://finport.am/full_news.php?id=44189&lang=3
- [203] G. Llopis T. and V. R. Angulo, "Guía de la Energía Geotérmica," Madrid, España, 2008. Accessed: Jun. 06, 2021. [Online]. Available: <https://www.fenercom.com/publicacion/guia-de-la-energia-geotermica-2008/>
- [204] A. Baba, T. Uzelli, and H. Sozbilir, "Distribution of geothermal arsenic in relation to geothermal play types: A global review and case study from the Anatolian plate (Turkey)," *J Hazard Mater*, vol. 414, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125510.
- [205] T. Guo, Y. Zhang, J. He, F. Gong, M. Chen, and X. Liu, "Research on geothermal development model of abandoned high temperature oil reservoir in North China oilfield," *Renew Energy*, vol. 177, pp. 1–12, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.05.128.
- [206] B. Rebecca Lindsey, L. Dahlman, and B. Jessica Blunden, "Climate Change: Global Temperature," *NOAA Climate Change: Global Temperature*, vol. 18, 2024.
- [207] C. Schwartz *et al*, "Evaluation of LTPP Climatic Data for Use In Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide(MEPDG) Calibration and other Pavement Analysis," 2015.
- [208] J. A. Ortiz Lozano, "Propuesta metodológica para la optimización de cemento," Barcelona, España, Oct. 2005.
- [209] K. E. Clare and A. E. Pollard, "The Effect Of Curing Temperature On the Compressive Strenght Of Soil-Cement Mixtures," *Géotechnique*, 1954. doi: <https://doi.org/10.1680/geot.1954.4.3.97>.
- [210] G. Kalankamary P., "Shrinkage Characteristics of Soil-Cement Mixtures," 1968.
- [211] O. Aduvire, "DRENAJE ACIDO DE MINA," Madrid, 2006.

- [212] M. Fall, J. C. Célestin, M. Pokharel, and M. Touré, "A contribution to understanding the effects of curing temperature on the mechanical properties of mine cemented tailings backfill," *Eng Geol*, vol. 114, no. 3–4, pp. 397–413, Aug. 2010, doi: 10.1016/j.enggeo.2010.05.016.
- [213] K. S. Oh and T. H. Kim, "Dependence of the material properties of lightweight cemented soil on the curing temperature," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 26, no. 7, 2014, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000940.
- [214] R. J. Zhang, Y. T. Lu, T. S. Tan, K. K. Phoon, and A. M. Santoso, "Long-term effect of curing temperature on the strength behavior of cement-stabilized clay," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 140, no. 8, 2014, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001144.
- [215] D. Wang, R. Zentar, and N. E. Abriak, "Temperature-accelerated strength development in stabilized marine soils as road construction materials," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 29, no. 5, May 2017, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001778.
- [216] Y. Kido, S. Nishimoto, H. Hayashi, and H. Hashimoto, "Effects of curing temperatures on the strength of cement-treated peat," *Civil Engineering Research Institute for Cold Region*, 2009.
- [217] K. Fang and M. Fall, "Effects of curing temperature on shear behaviour of cemented paste backfill-rock interface," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 112, pp. 184–192, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.ijrmms.2018.10.024.
- [218] ASTM International, "C494/C494M Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete 1," p. undefined-15, 2019, doi: 10.1520/C0494_C0494M-19.
- [219] S. Haruna and M. Fall, "Time- and temperature-dependent rheological properties of cemented paste backfill that contains superplasticizer," *Powder Technol*, vol. 360, pp. 731–740, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.powtec.2019.09.025.
- [220] ASTM International, "C1157 Standard Performance Specification for Hydraulic Cement 1," 2020, doi: 10.1520/C1157_C1157M-20.
- [221] L. C. Hernández G. and N. F. Lizarazo, "Resilient module soil-cement prediction based on setting temperature," *Ingeniería e Investigación*, vol. 40, no. 2, pp. 1–7, 2020, doi: 10.15446/ing.investig.v40n2.83120.
- [222] J. J. Calderón O., "Construcción de carreteras con suelo cemento en Colombia," 360 en Concreto.
- [223] A. J. Bryan, "Criteria for the Suitability of Soil for Cement Stabilization," 1988.
- [224] Y. Kehinde Ariye, K. Abdulmalik, and A. Olarenwaju Adigun, "Soil-Cement Stabilization Using Papalanto to Sagamu Road in Ogun State, Nigeria as Case Study," *The*

International Journal of Engineering and Science (IJES), vol. 9, no. 6, pp. 27–35, 2020, doi: 10.9790/1813-0906022735.

- [225] K. T. Chhun, H. Choo, P. Kaothon, and C.-Y. Yune, “Experimental study on the strength behavior of cement-stabilized sand with recovered carbon black,” *Geomechanics and Engineering*, vol. 23, no. 1, pp. 31–38, 2020.
- [226] Portland Cement Association, “Cement-Stabilized Subgrade (CSS) Soils and Cement Modified Soils (CMS) Case Histories,” PCA American Cement Manufactures.
- [227] ACI, *Report on soil cement (ACI 230.1R-09)*. American Concrete Institute, 2009.
- [228] G. Jerod and A. Wayne, “Cement-Stabilized Subgrade Soils,” 2020.
- [229] G. D. Reeder, D. S. Harrington, M. E. Ayers, and W. Adaska, “Guide to Full-Depth Reclamation (FDR) with Cement,” Skokie, IL, Jan. 2017.
- [230] ASTM International, “C1768C1768M.35679,” *ASTM*, 2017.
- [231] AASTHO, “T 134, Standard Method of Test for Moisture-Density Relations of Soil-Cement Mixtures,” *Materials, Testing & Pavement*. p. undefined-6, 2019.
- [232] AASTHO, “T 135, Standard Method of Test for Wetting-and-Drying Test of Compacted Soil-Cement Mixtures,” *Materials, Testing & Pavement*. p. undefined-7, 2013.
- [233] AASTHO, “T 136, Standard Method of Test for Freezing-and-Thawing Tests of Compacted Soil-Cement Mixtures,” *Materials, Testing & Pavement*. p. undefined-9, 2013.
- [234] FHWA, “User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction,” FHWA-RD-97-148. [Online]. Available: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/about.cfm>
- [235] European Standard, *BS EN 14227-15: 2015 Mezclas ligadas hidráulicamente*. 2015.
- [236] Giulia. Viggiani, *Geotechnical aspects of underground construction in soft ground: Proceedings of the 7th International Symposium on Geotechnical Aspects fo Underground Construction in Soft Ground, Roma, Italy, 17-19 May, 2011*. CRC Press, 2012.
- [237] M. Terashi and H. Tanaka, “Ground Improved by Deep Mixing Method,” 1981.
- [238] A. Melentijevic S. and C. Oteo, “Application of cement deep mixing method for underpinning,” Paris, 2013.
- [239] T. Kawasaki, A. Niina, S. Saitoh, Y. Suzuki, and Y. Honjyo, “Deep Mixing Method Using Cement Hardening Agent,” 1981.

- [240] S. Saitoh, Y. Suzuki, and K. Shirai, "Endurecimiento del suelo mejorado por el método de mezcla profunda," 1985.
- [241] M. Terashi, "I Conferencia temática: Método de mezcla profunda - Breve," Kawasaki, Japan, 1997.
- [242] S. Ríos, A. Viana da Fonseca, and B. A. Baudet, "The effect of the porosity/cement Ratio on the compression of Cemented Soil," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp. 1–19, Jan. 2012.
- [243] Y. S. Fang, Y. T. Chung, F. J. Yu, and T. J. Chen, "Properties of soil-cement stabilised with deep mixing method," *Ground Improvement*, vol. 5, no. 2, pp. 69–74, 2001.
- [244] H. Ju, G. M. Filz, R. A. Green, and M. Mauldon, "Influence of Curing Temperature on Strength of Cement-treated Soil and Investigation of Optimum Mix Design for the Wet Method of Deep Mixing," 2018.
- [245] R. Nevárez-Garibaldi, G. M. Filz, B. Castellanos, and J. K. Mitchell, "Influences of Test Conditions and Mixture Proportions on Property Values of Soil Treated with Cement to Represent the Wet Method of Deep Mixing," 2017.
- [246] ASTM International, "D1557 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)),", *ASTM*, 2021, doi: 10.1520/D1557-12R21.
- [247] ASTM International, "D698 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)) 1," *ASTM*, 2021, doi: 10.1520/D0698-12R21.
- [248] ASTM International, "D1632 Standard Practice for Making and Curing Soil-Cement Compression and Flexure Test Specimens in the Laboratory," *ASTM*, 2020, doi: 10.1520/D1632-17E01.
- [249] INVIAS, "E-156 Standard Test Resilient Soil and Aggregate Module," *INVIAS*, pp. 545–584, 2013.
- [250] T. P. Trindade *et al.*, "Resilient Modulus of Soils and Soil-Cement Mixtures 'Resilient Modulus of Soils and Soil-Cement Mixtures,' ASTMSTP 1437, Resilient Modulus Testing for Pavement Components," *ASTM*, pp. 99–133, 2003. [Online]. Available: www.astm.org
- [251] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, 2nd ed. Arizona: Limusa Wiley, 2004.
- [252] M. Balzarini, C. Bruno, M. Córdoba, and I. Teich, "Tools in Multivariate Statistical Analysis," Córdoba, Argentina, 2015.

- [253] J. F. Hair, W. C. Black, B. J. Babin, and R. E. Anderson, "Multivariate data analysis eighth edition," 2019. [Online]. Available: www.cengage.com/highered
- [254] W. N. Venables and D. M. Smith, "An Introduction to R Notes on R: A Programming Environment for Data Analysis and Graphics Version 4.0.4 (2021-02-15)," 1997.
- [255] D. N. Gujarati and D. C. Porter, "Econometría," *Mc Graw Hill*, vol. 5, pp. 1–946, 2009.
- [256] B. Indraratna, D. J. Armaghani, A. Gomes Correia, H. Hunt, and T. Ngo, "Prediction of resilient modulus of ballast under cyclic loading using machine learning techniques," *Transportation Geotechnics*, vol. 38, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.trgeo.2022.100895.
- [257] W. lie Zou, Z. Han, L. qiang Ding, and X. qun Wang, "Predicting resilient modulus of compacted subgrade soils under influences of freeze–thaw cycles and moisture using gene expression programming and artificial neural network approaches," *Transportation Geotechnics*, vol. 28, May 2021, doi: 10.1016/j.trgeo.2021.100520.
- [258] J. Ren, S. K. Vanapalli, Z. Han, K. O. Omenogor, and Y. Bai, "The resilient moduli of five Canadian soils under wetting and freeze–thaw conditions and their estimation by using an artificial neural network model," *Cold Reg Sci Technol*, vol. 168, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.coldregions.2019.102894.
- [259] W. lie Zou, Z. Han, L. qiang Ding, and X. qun Wang, "Predicting resilient modulus of compacted subgrade soils under influences of freeze–thaw cycles and moisture using gene expression programming and artificial neural network approaches," *Transportation Geotechnics*, vol. 28, May 2021, doi: 10.1016/j.trgeo.2021.100520.
- [260] J. Liu, F. Liu, Z. Wang, E. O. Fanijo, and L. Wang, "Involving prediction of dynamic modulus in asphalt mix design with machine learning and mechanical-empirical analysis," *Constr Build Mater*, vol. 407, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133610.
- [261] S. Hanandeh, A. Ardah, and M. Abu-Farsakh, "Using artificial neural network and genetics algorithm to estimate the resilient modulus for stabilized subgrade and propose new empirical formula," *Transportation Geotechnics*, vol. 24, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.trgeo.2020.100358.
- [262] M. D. Nazzal and O. Tatari, "Evaluating the use of neural networks and genetic algorithms for prediction of subgrade resilient modulus," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 14, no. 4, pp. 364–373, Apr. 2013, doi: 10.1080/10298436.2012.671944.
- [263] M. D. Nazzal and O. Tatari, "Evaluating the use of neural networks and genetic algorithms for prediction of subgrade resilient modulus," *International Journal of*

- Pavement Engineering*, vol. 14, no. 4, pp. 364–373, Apr. 2013, doi: 10.1080/10298436.2012.671944.
- [264] J. Amat R., “Redes neuronales con R (2021),” *Cienciadedatos.net*, pp. 1–40, Jul. 2021. Accessed: Feb. 05, 2024. [Online]. Available: <https://cienciadedatos.net/documentos/68-redes-neuronales-r>
- [265] J.-P. Magnan and G. Youssefain, “Essai au bleu de méthylène et classification géotechnique des sols,” *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, pp. 93–104, 1989, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/266505679>
- [266] A. W. Skempton, “The Colloidal ‘Activity’ of Clays L’Activité colloïdale des argiles,” *ISSMGE*, no. 14, pp. 57–61, 1953, [Online]. Available: <https://www.issmge.org/publications/online-library>
- [267] P. Izabel Tremarin, T. Veiga Ludwig, and L. Carvalho Torgan, “Morphological variation and distribution of the freshwater diatom *Aulacoseira ambigua* (Grunow) Simonsen in Brazilian continental environments,” *Artigo Morphological*, no. 1, pp. 139–158, 2013.
- [268] L. Bouna *et al.*, “Understanding the impact of kaolinite/muscovite ratio in natural clays on oxide contents, physisorbed water, and structural water fractions,” *Mater Chem Phys*, vol. 314, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.matchemphys.2023.128858.
- [269] C. J. Johnston, R. A. Pepper, W. N. Martens, and S. Couperthwaite, “Relationship between thermal dehydroxylation and aluminium extraction from a low-grade kaolinite: Role of clay chemistry and crystallinity,” *Hydrometallurgy*, vol. 214, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.hydromet.2022.105967.
- [270] G. Lecomte-Nana, J. P. Bonnet, and N. Soro, “Influence of iron onto the structural reorganization process during the sintering of kaolins,” *J Eur Ceram Soc*, vol. 33, no. 4, pp. 661–668, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2012.10.024.
- [271] S. C. Ma, Z. G. Wang, J. L. Zhang, D. H. Sun, and G. X. Liu, “Detection analysis of surface hydroxyl active sites and simulation calculation of the surface dissociation constants of aqueous diatomite suspensions,” *Appl Surf Sci*, vol. 327, pp. 453–461, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.apsusc.2014.12.006.
- [272] Z. Bekissanova *et al.*, “Synthesis, characterization of silver/kaolinite nanocomposite and studying its antibacterial activity,” *Colloids Surf B Biointerfaces*, vol. 220, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.colsurfb.2022.112908.
- [273] ASTM International, “D5334 Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Rock by Thermal Needle Probe Procedure,” *ASTM*, 2023, doi: 10.1520/D5334-22AE01.

- [274] Highway Research Board, "Prediction of flexible pavement deflections from laboratory repeated-load test," California, 1967.
- [275] J. Peng, J. Zhang, J. Li, Y. Yao, and A. Zhang, "Modeling humidity and stress-dependent subgrade soils in flexible pavements," *Comput Geotech*, vol. 120, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.compgeo.2019.103413.
- [276] M. W. Witczak and J. Uzan, "The universal airport pavement design system, Report I of IV: Granular material characterization," *University of Maryland, College Park, MD*, 1988.
- [277] R. G. Hicks and C. L. Monismith, "Factors influencing the Resilient Response of Granular Materials," 1971.
- [278] R. Pezo and W. R. Hudson, "Prediction Models of Resilient Modulus for Nongranular Materials," *Geotechnical Testing Journal*, vol. 17, no. 3, pp. 349–355, Sep. 1994, doi: 10.1520/GTJ10109J.
- [279] D.-G. Kim, "DEVELOPMENT OF A CONSTITUTIVE MODEL FOR RESILIENT MODULUS OF COHESIVE SOILS," 2004.
- [280] M. S. Jin, K. W. Lee, and W. D. Kovacs, "Seasonal variation of resilient modulus of subgrade soils," *J Transp Eng*, vol. 120, no. 4, pp. 603–616, 1994, doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(1994)120:4(603).
- [281] J. Moossazadeh and M. W. Witczak, "Prediction of subgrade moduli for soil that exhibits nonlinear behavior," *Transportation Research Reord*, no. 810, pp. 9–17, 1981.
- [282] R. W. May and M. W. Witczak, "Effective Granular Modulus to Model Pavement Responses," *Transportation Research Reord*, no. 810, pp. 1–9, 1981.
- [283] T. C. Johnson, Berg R. L., and DiMillio A., "Frost Action Predictive Techniques: an overview of Research Results," *Transportation Research Reord*, 1986.
- [284] P. Tian, M. M. Zaman, and J. G. Laguros, "Gradation and Moisture Effects on Resilient Moduli of Aggregate Bases," *Transportation Research Reord*, 1986.
- [285] A. Dragos, "Development of a predictive model for the Resilient Modulus of Unbound materials," 2003.
- [286] NCHRP, "Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design (2004)," *Transportation Research Reord*, no. 285, pp. 1–48, Jan. 2004, doi: 10.17226/21960.
- [287] J. H. Oh, E. G. Fernando, C. Holzschuher, and D. Horhota, "Comparison of resilient modulus values for Florida flexible mechanistic-empirical pavement design," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 13, no. 5, pp. 472–484, Oct. 2012, doi: 10.1080/10298436.2011.633170.

- [288] Z. Han and S. K. Vanapalli, "State-of-the-Art: Prediction of Resilient Modulus of Unsaturated Subgrade Soils," *International Journal of Geomechanics*, vol. 16, no. 4, Aug. 2016, doi: 10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000631.
- [289] T. T. T. Tran, T. Nguyen, P. N. Pham, H. H. Nguyen, and P. Q. Nguyen, "Thermal distribution in cement-treated base: Effect of curing methods and temperature estimation using Artificial Neural Networks," *Constr Build Mater*, vol. 279, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122528.
- [290] N. Kardani, A. Zhou, S. L. Shen, and M. Nazem, "Estimating unconfined compressive strength of unsaturated cemented soils using alternative evolutionary approaches," *Transportation Geotechnics*, vol. 29, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.trgeo.2021.100591.
- [291] B. Indraratna, D. J. Armaghani, A. Gomes Correia, H. Hunt, and T. Ngo, "Prediction of resilient modulus of ballast under cyclic loading using machine learning techniques," *Transportation Geotechnics*, vol. 38, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.trgeo.2022.100895.
- [292] E. Tutumluer and R. W. Meier, "Attempt Resilient Modulus modeling using Artificial Neural Networks," *Transportation Research Record*, pp. 1–6, 1996.
- [293] J. Ren, S. K. Vanapalli, Z. Han, K. O. Omenogor, and Y. Bai, "The resilient moduli of five Canadian soils under wetting and freeze-thaw conditions and their estimation by using an artificial neural network model," *Cold Reg Sci Technol*, vol. 168, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.coldregions.2019.102894.
- [294] W. lie Zou, Z. Han, L. qiang Ding, and X. qun Wang, "Predicting resilient modulus of compacted subgrade soils under influences of freeze–thaw cycles and moisture using gene expression programming and artificial neural network approaches," *Transportation Geotechnics*, vol. 28, May 2021, doi: 10.1016/j.trgeo.2021.100520.
- [295] L. C. H. García and H. A. Colorado L., "Effect of Thermal Conductivity on the Mechanical Behavior of Marginal Construction Waste as a Structural Material for Recycled Pavements," in *TMS 2022 151st Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings*, Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 826–834.
- [296] L. C. Hernández García and H. A. Colorado Lopera, *Engineering for transformation*, Fondo Editorial EIA. 2022. Accessed: Feb. 26, 2025. [Online]. Available: chrome-extension://efaidnbmninnibpcapjpcglclefindmkaj/https://expoingenieria.edu.co/wp-content/uploads/2022/11/Libro-ExpoIngenieria-04.11.22.pdf
- [297] D. Beach, "MEETING REGULATIONS." [Online]. Available: www.ceramics.org
- [298] L. C. Hernández García, S. N. Monteiro, and H. A. C. Lopera, "Recycling Clay Waste from Excavation, Demolition, and Construction: Trends and Challenges," Jul. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/su16146265.

- [299] L. C. Hernández García and H. A. Colorado Lopera, "Effect of the loss on ignition on the unconfined compressive strength of residual clays from Bogotá-Colombia stabilized with cement," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 33, pp. 7123–7135, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.jmrt.2024.11.081.
- [300] L. C. H. García, J. V. Valencia, and H. A. Colorado L, "Modeling an artificial neural network to estimate cement consumption in clayey waste-cement mixtures based on curing temperature, mechanical strength, and resilient modulus," *Constr Build Mater*, vol. 467, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.140376.