



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA, PROPORCIÓN VOLUMÉTRICA DE BLOQUES Y LA GRADACIÓN EN LA RESISTENCIA AL CORTE DE MEZCLAS REMOLDEADAS DE SUELO Y ROCA**

**Juan Manuel Betancur Marín**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de ingeniería Civil  
Medellín, Colombia  
2020





UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **INFLUENCE OF GEOMETRY, VOLUMETRIC BLOCK PROPORTION AND GRADATION IN THE SHEAR STRENGTH OF REMOLDED SOIL-ROCK MIXTURES**

**Juan Manuel Betancur Marín**

National University of Colombia  
Faculty of Mines, Civil Engineer Department  
Medellín, Colombia

2020





# **INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA, PROPORCIÓN VOLUMÉTRICA DE BLOQUES Y LA GRADACIÓN EN LA RESISTENCIA AL CORTE DE MEZCLAS REMOLDEADAS DE SUELO Y ROCA**

**Juan Manuel Betancur Marín**

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ingeniería-Geotecnia**

Director:

PhD., Francisco Javier Nanclares Arango

Co-Director:

MSc, Oscar Echeverrı Ramírez

Línea de Investigaciın:

Caracterizaciın de geomateriales.

Grupo de Investigaciın:

Geotecnia

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Civil

Medellín, Colombia

2020



*Dedicatoria*

*Este logro se lo dedico inicialmente a Dios, sus propósitos han guiado mi camino.*

*Se lo dedico también a mis padres, Soledad y Omar, quienes siempre me han apoyado con su amor, orientación y sabiduría. Su apoyo y entrega han sido de gran valor para mí a lo largo de la vida.*

*Finalmente, se lo ofrendo a mi esposa, Karen Vallejo, quien me ha acompañado en cada paso dado. Ella ha sido mi fortaleza e inspiración para alcanzar este logro.*

*“Porque el oro se prueba en el fuego, y el valor de los hombres en la adversidad”  
Eclesiásticos 2:5-7*

## *Agradecimientos*

*Inicialmente le quiero agradecer a mi asesor de tesis, PhD., Francisco Javier Nanclares Arango. Su guía, confianza, conocimiento y generosidad han sido invaluable y sin él, este trabajo no se hubiese podido materializar. Gratitud al MSc. Oscar Echeverri y a los empleados de la Facultad de Minas por su apoyo y ayuda en la realización de los ensayos en campo.*

*Un reconocimiento especial a los estudiantes que participaron en la realización de las pruebas in-situ (David, Nactaly y Camilo), su esfuerzo y compromiso permitieron lograr este objetivo. También debo mencionar al Arquitecto Nolan Bula y al proyecto Distribuidora Sur, por facilitarme un espacio para la realización de las pruebas en campo.*

*Agradecimientos a la Universidad Nacional de Colombia por su apoyo y subvención para esta investigación. Mil gracias también a Integral y EPM que generosamente facilitaron información vital que fue sustento de esta investigación. Un reconocimiento especial a ISAGEN quien donó a la Universidad algunos de los equipos utilizados en la presente investigación.*

## Resumen

Existen geomateriales conformados por mezclas entre suelo y bloques de roca, las cuales, dadas sus características (presencia de bloques y contraste en la resistencia de los materiales), son de difícil caracterización mecánica. Por lo anterior, determinar los parámetros de resistencia al corte de estos geomateriales se convierte en una tarea compleja; debido a que hay una combinación del aporte de la matriz y de los bloques. En el estudio de estos materiales, la práctica ingenieril opta en ocasiones por despreciar el aporte de los bloques en la resistencia de todo el conjunto o usar valores de referencia. Estas prácticas llevan en ocasiones a diseños muy conservadores, o en los peores escenarios, a diseños inseguros. Debido a la variedad de orígenes se tienen las mezclas suelo-roca en la naturaleza (depósitos de vertiente, depósitos aluviales, suelos residuales, depósitos glaciares, llenos antrópicos, etc.), es preponderante tener un mejor conocimiento del comportamiento mecánico de los mismos. Pensando en las limitantes mencionadas, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo estudiar el comportamiento geomecánico de las mezclas suelo-roca, buscando determinar la influencia de la geometría, la proporción volumétrica de bloques y la gradación, en la resistencia al corte de estos materiales. Los resultados de la investigación arrojaron ecuaciones que correlacionan la proporción bloques-matriz y su distribución granulométrica, con la resistencia de las mezclas suelo-roca. Se corroboró, así mismo, que propiedades como la proporción volumétrica de bloques, tienen gran influencia en parámetros como el ángulo de fricción interna del conjunto suelo-bloques. Las correlaciones halladas y los resultados de la investigación fueron validados a partir de pruebas in-situ *HCT* (Hydraulic Cylinder Test), sobre materiales de diferentes formas y orígenes (llenos antrópicos y depósitos de vertiente), que permitieron validar las ecuaciones halladas a partir de la investigación.

**Palabras clave:** Bimrocks, bimsoils, caracterización, mezclas suelo-roca, proporción volumétrica de bloques, resistencia al corte, prueba de cilindro hidráulico.

## Abstract

There are geomaterials formed by mixtures between blocks and soils, which, given their characteristics (presence of blocks and contrast in shear resistance of these materials), are difficult to characterize. Determine the shear resistance parameters of these geomaterials becomes a complex task, because there is a contribution of the matrix and the blocks. In the study of this material, the engineering practice sometimes opts to neglect the contribution of the blocks in the resistance of the whole, or use reference values. These practices sometimes lead to very conservative designs, or in the worst scenarios, to unsafe designs. Due to the variety of origins that soil-rock mixtures are present in nature (coluvial deposits, alluvial deposits, tropical soils, glacial deposits, anthropogenic deposits, etc.), it is important to have a better knowledge of their geomechanical behavior. Thinking about the limitations, the present research aims to study the geomechanical behavior of soil-rock mixtures, in search of the influence of properties such as geometry, the blocks proportion and gradation, in the shear resistance of these materials. The results of the investigation showed equations that correlated the block-matrix proportion and the granulometric properties, with the resistance of soil-rock mixtures. It was corroborated, among other things, that the properties such as the volumetric block proportion has a great influence on the parameters such as the internal friction angle of the material. The correlations found and the results of the investigation was validated from in-situ HCT (Hydraulic Cylinder Test) tests, on materials of different shapes and origins (alluvial and coluvial deposits), finding that the equations found from the research, offer good results.

**Keywords:** bimrocks, bimsoils, characterization, soil-rock mixtures, volumetric block proportion, shear strength, Hydraulic cylinder test.

# Contenido

	Pág.
<b>1. Introducción .....</b>	<b>29</b>
1.1 Planteamiento del problema.....	29
1.2 Justificación.....	32
1.3 Objetivo general .....	34
1.4 Objetivos específicos .....	34
1.5 Alcance .....	35
1.6 Contenido.....	36
<b>2. Antecedentes y Marco Teórico.....</b>	<b>38</b>
2.1 Origen de los materiales estudiados.....	38
2.1.1 Depósitos aluviales y aluvio-torrenciales .....	39
2.1.2 Depósitos de vertiente .....	40
2.1.3 Depósitos glaciares .....	40
2.1.4 Suelo tropical.....	41
2.1.5 Lleno antrópico .....	43
2.2 Enfoque de los <i>Bims</i> .....	43
2.2.1 Caracterización de los <i>Bims</i> .....	47
2.2.2 Definición límite entre matriz y bloque .....	47
2.2.3 Definición de la proporción volumétrica de bloques (VBP).....	55
2.2.4 Resistencia al corte de los bimrocks/bimsoils .....	63
2.2.5 Consideraciones generales sobre la resistencia de los bimrocks/bimsoils .....	83
<b>3. Metodología de trabajo .....</b>	<b>87</b>
3.1 Actividades.....	88
3.2 Recopilación y análisis de información secundaria.....	90
3.3 Ensayos mecánicos .....	90
3.3.1 Ensayo de Compresión Triaxial .....	91
3.4 Sitios para ensayos in-situ HCT .....	98
3.5 Ensayo no convencional <i>HCT</i> (Hydraulic Cylinder Test).....	101
3.5.1 Equipo .....	102
3.5.2 Procedimiento.....	106
3.5.3 Obtención de parámetros de resistencia al corte .....	109
<b>4. Resultados.....</b>	<b>112</b>
4.1 Materiales estudiados .....	112
4.1.1 Características de los materiales .....	113
4.1.2 Granulometría.....	115
4.2 Determinación del límite entre matriz y bloque .....	120

---

4.2.1	Límite matriz bloque usando la metodología de (Medley E. , 1994).....	121
4.2.2	Límite matriz bloque usando la metodología de (Nanclares, 2018).....	122
4.2.3	Comparación de límite entre matriz y bloque definidas por ambas metodologías	130
4.3	Determinación de la proporción volumétrica de bloques <b>VBP</b> .....	132
4.4	Determinación de parámetros de resistencia al corte ( $c'$ y $\phi'$ ).....	141
4.5	Relación entre la proporción volumétrica de bloques (VBP) y la resistencia ...	150
4.5.1	Relación entre la proporción volumétrica de bloques (VBP) y el ángulo de fricción efectivo $\phi'$ .....	151
4.5.2	Relación entre la proporción volumétrica de bloques (VBP) y la cohesión efectiva $c'$ .....	156
4.6	Relación entre la forma de los bloques y la resistencia .....	162
4.7	Relación entre la gradación y la resistencia .....	164
4.8	Validación de resultados .....	167
4.8.1	Realización de ensayo in situ HCT .....	167
4.8.2	Caracterización física y geológica del material estudiado .....	177
4.8.3	Resultados comparación datos in situ vs correlaciones.....	196
<b>5.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>227</b>
<b>6.</b>	<b>Anexos.....</b>	<b>236</b>
6.1	Resultados ensayo de laboratorio “Distribuidora de Envigado” .....	236
6.2	Resultados ensayo de laboratorio “Finca Las Mercedes” .....	242
6.3	Registro fotográfico ensayos in-situ HCT .....	244
<b>7.</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>248</b>



## Lista de Figuras

	Pág.
<b>Figura 1-1.</b> Aplicabilidad de diferentes ensayos geotécnicos in-situ.....	31
<b>Figura 2-1.</b> Ejemplos de depósitos aluviales con mezclas de bloques de roca y suelo. .	39
<b>Figura 2-2.</b> Ejemplos de depósito de vertiente en Robledo - Medellín (Arriba) y Tarso – Antioquia, con mezclas de bloques de roca y suelo. ....	40
<b>Figura 2-3.</b> Ejemplos de depósitos glaciares con mezclas de bloques de roca y suelo..	41
<b>Figura 2-4.</b> Mezclas suelo-roca producto de la meteorización. ....	42
<b>Figura 2-5.</b> Ejemplos de perfil de suelo tropical con intercalaciones de bloques de roca y suelo. Perfil de meteorización de (Deere & Patton, 1971) del Batolito antioqueño en El Peñol – Antioquia (Arriba) y meteorización esferoidal en Tarso – Antioquia (Abajo).....	42
<b>Figura 2-6.</b> Ejemplos de lleno antrópico con mezclas de bloques de roca y suelo. Zodme El Tejar (Izquierda) y Zodme La Redonda (Derecha). Vía San Andrés de Cuerquia – Ituango. ....	43
<b>Figura 2-7.</b> Secciones a través de tres especímenes fallados por compresión triaxial de modelos físicos de Melanges, mostrando que la superficie de falla se presenta, rodeando de los bloques. ....	45
<b>Figura 2-8.</b> Ejemplos de bimsoils de diferentes orígenes. Depósito coluvial en San Andrés de Cuerquia – Antioquia (Arriba), depósito aluvial del río Medellín a la altura de Envigado - Antioquia (Intermedia) y lleno antrópico en la Avenida Regional a la altura de Envigado – Antioquia (Abajo).....	46
<b>Figura 2-9.</b> Ejemplos de la independencia de la escala en el melange Franciscano. ....	48
<b>Figura 2-10.</b> Bloques de un melange en la playa de Caspar. Se observa el dmod, el cual sólo se mide de bloques completos.....	49
<b>Figura 2-11.</b> Histograma log-log obtenido por Medley, en donde se relaciona la frecuencia relativa y el tamaño de bloques de un Melange del Complejo Franciscano. ....	50

<b>Figura 2-12.</b> Distribución de bloques normalizada para identificar la independencia de la escala. ....	51
<b>Figura 2-13.</b> Histograma log-log obtenido por Coli et al, en donde se relaciona la frecuencia relativa y el tamaño de bloques de un Complejo Caliza-Esquisto de La Toscana. ....	52
<b>Figura 2-14.</b> Ejemplos de curvas para determinar el límite entre matriz y bloques usando la metodología de Nanclares.....	55
<b>Figura 2-15.</b> Diferencia entre la dimensión máxima observable de bloque $d_{mod}$ en un afloramiento o la cuerda de una perforación, con el diámetro real del bloque. ....	57
<b>Figura 2-16.</b> Arreglo matricial de las 100 proporciones lineares de bloques medidas en el modelo físico de Medley. ....	58
<b>Figura 2-17.</b> Ábacos para determinar la incertidumbre en asumir que la proporción lineal de bloques es igual a la proporción volumétrica de bloques.....	59
<b>Figura 2-18.</b> Histograma de distribución de tamaños de bloques 3D (barras negras) para los cuatro modelos físicos de Medley, y distribución de longitud de cuerdas obtenidas de las líneas de muestreo (Arriba). Distribución real 3D de tamaño de bloques y distribución 1D de longitudes de cuerda para los cuatro modelos físicos de Medley (Abajo). ....	60
<b>Figura 2-19.</b> Error estándar obtenido a partir de las simulaciones numéricas.....	61
<b>Figura 2-20.</b> Tipos de muestras ensayadas por (Lindquist & Goodman, 1994).....	65
<b>Figura 2-21.</b> Cohesión vs Proporción de bloques para diferentes orientaciones de bloques. ....	65
<b>Figura 2-22.</b> Ángulo de fricción vs Proporción de bloques para diferentes orientaciones de bloques. ....	66
<b>Figura 2-23.</b> Influencia de la distribución de tamaño de bloques en la rugosidad de la superficie de falla para dos distribuciones diferentes con la misma proporción volumétrica de bloques. ....	67
<b>Figura 2-24.</b> Influencia del coeficiente de uniformidad y el coeficiente de curvatura en el ángulo de fricción de muestras remoldeadas de origen aluvial. ....	68
<b>Figura 2-25.</b> Influencia del coeficiente de uniformidad y el coeficiente de curvatura en la cohesión de muestras remoldeadas de origen aluvial. ....	68
<b>Figura 2-26.</b> Efecto de la VBP en el ángulo de fricción interna de los bimrocks.....	71
<b>Figura 2-27.</b> Esquema (Izquierda) y fotografía (Derecha) del “ <i>bimtest</i> ”. ....	72
<b>Figura 2-28.</b> Correlación entre el ángulo de fricción (Izquierda) y la cohesión (Derecha) con la proporción de bloques. ....	73

**Figura 2-29.** Equipo y esquema del ensayo de corte directo de gran dimensión..... 73

**Figura 2-30.** Efecto de la proporción de bloques en la cohesión y el ángulo de fricción de mezclas remoldeadas de suelo y roca..... 74

**Figura 2-31.** Efecto de la proporción equivalente de bloques *EBP* (Izquierda) y el contraste entre los bloques y la matriz (Derecha), en la resistencia a la compresión simple de los bimrocks de matriz soldada. .... 75

**Figura 2-32.** Relación entre la resistencia normalizada y la proporción volumétrica de bloques *VBP*. .... 76

**Figura 2-33.** Relación entre los parámetros de resistencia y la proporción de bloques de muestras remoldeadas de origen aluvial. Resultados obtenidos a partir de ensayos de Corte Directo (Arriba) y Compresión Triaxial (Abajo). .... 77

**Figura 2-34.** Efecto de la forma y orientación de los bloques en la estabilidad de taludes. .... 78

**Figura 2-35.** Diagrama de flujo para determinar la resistencia al corte de un *bim*..... 79

**Figura 2-36.** Ábaco para seleccionar *A* en función de la resistencia de la matriz y la forma de los bloques. .... 79

**Figura 2-37.** Parámetros medidos y calculados del calcado de la tortuosidad de las superficies de falla..... 80

**Figura 2-38.** Superficies de falla calcadas de muestras de *bims* (izquierda) y gráficos de la proporción de bloques en función de los parámetros medidos (derecha). .... 81

**Figura 2-39.** Resistencia pico de mezclas de arena-arcilla en función de la porosidad. . 82

**Figura 2-40.** Consideraciones a la hora de trabajar con *bimrocks*..... 84

**Figura 2-41.** Ilustración esquemática de la resistencia al corte para *bims* con matriz soldada (arriba) y no soldada (abajo). .... 85

**Figura 2-42.** Esquema de los factores que influyen en la resistencia de los *bimsoils* y *bimrocks*. .... 86

**Figura 3-1.** Equipo triaxial de gran dimensión usado para los ensayos de la Fuente 1. . 92

**Figura 3-2.** Esquema del equipo triaxial de gran dimensión usado para los ensayos de la Fuente 2. .... 93

**Figura 3-3.** Equipo triaxial de gran dimensión usado para los ensayos de las Fuentes 4, 7 y 8. .... 94

**Figura 3-4.** Equipo triaxial de gran dimensión usado para los ensayos de las Fuentes 5 y 6. .... 95

<b>Figura 3-5.</b> Cámara esférica de acero del equipo de compresión triaxial de gran escala para los ensayos de la Fuente 9. ....	96
<b>Figura 3-6.</b> Marco de cargas del equipo triaxial de gran escala para los ensayos de la Fuente 9.....	97
<b>Figura 3-7.</b> Localización sitios para realización de ensayos in situ HCT.....	98
<b>Figura 3-8.</b> Localización realización ensayo en Distribuidora de Envigado.....	99
<b>Figura 3-9.</b> Localización realización ensayo en Finca Las Mercedes. ....	101
<b>Figura 3-10.</b> Cilindro hidráulico marca ENERPAC para realización de ensayo HCT.....	103
<b>Figura 3-11.</b> Bomba y mangueras de alta presión para accionar cilindro hidráulico para realización de ensayo HCT. ....	103
<b>Figura 3-12.</b> Manómetro marca ASHCROFT para medir la presión aplicada por la bomba. ....	104
<b>Figura 3-13.</b> Rótula metálica. ....	105
<b>Figura 3-14.</b> Placas en acero para aplicación de carga y reacción.....	105
<b>Figura 3-15.</b> Extensómetro para medición de desplazamientos. ....	106
<b>Figura 3-16.</b> Esquema y dimensiones del cilindro hidráulico (izquierda) y de la excavación (derecha). Unidades en centímetros. ....	107
<b>Figura 3-17.</b> Posicionamiento del cilindro en la trinchera y montaje para realización de ensayo HCT.....	108
<b>Figura 3-18.</b> Etapas del ensayo HCT. ....	110
<b>Figura 3-19.</b> Ejemplo de calibración de curvas esfuerzo-desplazamiento.....	111
<b>Figura 4-1.</b> Digitalización granulometría del material 1.1 (Granulometría A) y 1.2 (Granulometría B) – Curva original (izquierda) y digitalizada (derecha).....	115
<b>Figura 4-2.</b> Digitalización granulometría del material 2.1 y 2.3 (Granulometría A) y 2.2 y 2.4 (Granulometría B) – Curva original (izquierda) y digitalizada (derecha).....	115
<b>Figura 4-3.</b> Digitalización granulometría del material 3.1 (Granulometría A) y 3.2 (Granulometría B) – Curva original (izquierda) y digitalizada (derecha).....	116
<b>Figura 4-4.</b> Granulometría del material 4.1 (Granulometría Excavación 2A), 4.2 (Granulometría Excavación 2B), 4.3 (Granulometría San Andrés 2A) y 4.4 (Granulometría San Andrés 2B) – Curvas antes (izquierda) y después (derecha) de ensayo.....	116
<b>Figura 4-5.</b> Granulometría del material 5.1 (0% Gravel 3 ¼”), 5.2 (0% Gravel 9”), 5.3 (35% Gravel), 5.4 (50% Gravel) y 5.5 (65% Gravel) – Curvas original (izquierda) y digitalizada (derecha). ....	117

<b>Figura 4-6.</b> Granulometría del material 6.1 (0% Gravel), 6.2 (20% Gravel), 6.3 (35% Gravel), 6.4 (50% Gravel) y 6.5 (65% Gravel) – Curvas original (izquierda) y digitalizada (derecha).....	117
<b>Figura 4-7.</b> Granulometría del material 7.1 (Ret ¾”), 7.2 (Ret N°4), 7.3 (Ret N°10), 7.4 (Ret N°40), 7.5 (Ret ¾” + Ret N°4), 7.6 (Ret ¾” + Ret N°4 + Ret N°10), 7.7 (Ret ¾” + Ret N°4 + Ret N°10 + Ret N°40) – Curvas original (izquierda) y digitalizada (derecha). .....	118
<b>Figura 4-8.</b> Granulometría del material 8.1 (Granulometría3B1), 8.2 (Granulometría 3B4), 8.3 (Granulometría 3C1) y 8.4 (Granulometría 3C4) – Curvas antes (izquierda) y después (derecha) de ensayo.....	118
<b>Figura 4-9.</b> Granulometría del material 9.1 (Basalto de San Francisco (Material 1)), 9.2 (Arena y grava de Pinzandaran), 9.3 (Conglomerado de Malpaso), 9.4 (Conglomerado de El Infernillo), 9.5 (Basalto de San Francisco (Materal 2)), 9.6 (Gneis granítico de Mica, gradación X), 9.7 (Gneis granítico de Mica, gradación Y).....	119
<b>Figura 4-10.</b> Compilación de las curvas granulométricas de todos los materiales recopilados.....	120
<b>Figura 4-11.</b> Resultados límite matriz bloque para material 1.1 (izquierda) y 1.2 (derecha) usando la metodología de (Nanclares, 2018). .....	122
<b>Figura 4-12.</b> Resultados límite matriz bloque para material 2.1 y 2.3 (izquierda) y 2.2 y 2.4 (derecha) usando la metodología de (Nanclares, 2018). .....	123
<b>Figura 4-13.</b> Resultados límite matriz bloque para material 3.1 (izquierda) y 3.2 (derecha) usando la metodología de (Nanclares, 2018). .....	123
<b>Figura 4-14.</b> Resultados límite matriz bloque para material 4.1 (superior izquierda), 4.2 (superior derecha), 4.3 (inferior izquierda) y 4.4 (inferior derecha) usando la metodología de (Nanclares, 2018).....	124
<b>Figura 4-15.</b> Resultados límite matriz bloque para material 5.1 (superior izquierda), 5.2 (superior derecha), 5.3 (intermedio izquierda), 5.4 (intermedio derecha) y 5.5 (inferior) usando la metodología de (Nanclares, 2018). .....	125
<b>Figura 4-16.</b> Resultados límite matriz bloque para material 6.1 (superior izquierda), 6.2 (superior derecha), 6.3 (intermedio izquierda), 6.4 (intermedio derecha) y 6.5 (inferior) usando la metodología de (Nanclares, 2018). .....	126
<b>Figura 4-17.</b> Resultados límite matriz bloque para material 7.1 (superior izquierda), 7.2 (superior derecha), 7.3 (intermedio-superior izquierda), 7.4 (intermedio-superior derecha), 7.5 (intermedio-inferior izquierda), 7.6 (intermedio-inferior derecha) y 7.7 (inferior) usando la metodología de (Nanclares, 2018).....	127

---

<b>Figura 4-18.</b> Resultados límite matriz bloque para material 8.1 (superior izquierda), 8.2 (superior derecha), 8.3 (inferior izquierda) y 8.4 (inferior derecha) usando la metodología de (Nanclares, 2018).....	128
<b>Figura 4-19.</b> Resultados límite matriz bloque para material 9.1 (superior izquierda), 9.2 (superior derecha), 9.3 (intermedio-superior izquierda), 9.4 (intermedio-superior derecha), 9.5 (intermedio-inferior izquierda), 9.6 (intermedio-inferior derecha) y 9.7 (inferior) usando la metodología de (Nanclares, 2018). ....	129
<b>Figura 4-20.</b> Resultados VBP para material 1.1 (izquierda) y 1.2 (derecha). ....	132
<b>Figura 4-21.</b> Resultados VBP para material 2.1, 2.3 (izquierda), 2.2 y 2.4 (derecha)....	133
<b>Figura 4-22.</b> Resultados VBP para material 3.1 (izquierda) y 3.2 (derecha). ....	133
<b>Figura 4-23.</b> Resultados VBP para material 4.1 (superior izquierda), 4.2 (superior derecha), 4.3 (inferior izquierda) y 4.4 (inferior derecha).....	134
<b>Figura 4-24.</b> Resultados VBP para material 5.1 (superior izquierda), 5.2 (superior derecha), 5.3 (intermedio izquierda), 5.4 (intermedio derecha) y 5.5 (inferior). ....	135
<b>Figura 4-25.</b> Resultados VBP para material 6.1 (superior izquierda), 6.2 (superior derecha), 6.3 (intermedio izquierda), 6.4 (intermedio derecha) y 6.5 (inferior). ....	136
<b>Figura 4-26.</b> Resultados VBP para material 7.1 (superior izquierda), 7.2 (superior derecha), 7.3 (intermedio-superior izquierda), 7.4 (intermedio-superior derecha), 7.5 (intermedio-inferior izquierda), 7.6 (intermedio-inferior derecha) y 7.7 (inferior). ....	137
<b>Figura 4-27.</b> Resultados VBP para material 8.1 (superior izquierda), 8.2 (superior derecha), 8.3 (inferior izquierda) y 8.4 (inferior derecha).....	138
<b>Figura 4-28.</b> Resultados VBP bloque para material 9.1 (superior izquierda), 9.2 (superior derecha), 9.3 (intermedio-superior izquierda), 9.4 (intermedio-superior derecha), 9.5 (intermedio-inferior izquierda), 9.6 (intermedio-inferior derecha) y 9.7 (inferior). ....	140
<b>Figura 4-29.</b> Envolvente de falla de Mohr-Coulomb. Tomado de (Braja M. Das, 2001)	142
<b>Figura 4-30.</b> Envolvente de falla para material 1.1 (izquierda) y 1.2 (derecha). ....	142
<b>Figura 4-31.</b> Envolvente de falla para material 2.1 (superior izquierda), 2.2 (superior derecha), 2.3 (inferior izquierda) y 2.4 (inferior derecha).....	143
<b>Figura 4-32.</b> Envolvente de falla para material 3.1 (izquierda) y 3.2 (derecha). ....	143
<b>Figura 4-33.</b> Envolvente de falla para material 4.1 (superior izquierda), 4.2 (superior derecha), 4.3 (inferior izquierda) y 4.4 (inferior derecha).....	144

**Figura 4-34.** Envoltente de falla para material para material 5.1 (superior izquierda), 5.2 (superior derecha), 5.3 (intermedio izquierda), 5.4 (intermedio derecha) y 5.5 (inferior). .....145

**Figura 4-35.** Envoltente de falla para material para material 6.1 (superior izquierda), 6.2 (superior derecha), 6.3 (intermedio izquierda), 6.4 (intermedio derecha) y 6.5 (inferior). .....146

**Figura 4-36.** Envoltentes de falla para material 7.1 (superior izquierda), 7.2 (superior derecha), 7.3 (intermedio-superior izquierda), 7.4 (intermedio-superior derecha), 7.5 (intermedio-inferior izquierda), 7.6 (intermedio-inferior derecha) y 7.7 (inferior).....147

**Figura 4-37.** Envoltente de falla para material 8.1 (superior izquierda), 8.2 (superior derecha), 8.3 (inferior izquierda) y 8.4 (inferior derecha). .....148

**Figura 4-38.** Envoltente de falla para material 9.1 (superior izquierda), 9.2 (superior derecha), 9.3 (intermedio-superior izquierda), 9.4 (intermedio-superior derecha), 9.5 (intermedio-inferior izquierda), 9.6 (intermedio-inferior derecha) y 9.7 (inferior).....149

**Figura 4-39.** Correlación lineal entre el ángulo de fricción  $\phi'$  y la VBP hallada por el método de Nanclares. ....151

**Figura 4-40.** Correlación potencial entre el ángulo de fricción  $\phi'$  y la VBP hallada por el método de Nanclares. ....152

**Figura 4-41.** Correlación potencial entre el ángulo de fricción  $\phi'$  y la VBP hallada por el método de Medley. ....152

**Figura 4-42.** Correlación lineal entre el incremento del ángulo de fricción  $\Delta\phi'$  y la VBP hallada por el método de Medley – Datos crudos (derecha) y eliminando dos valores extremos (izquierda).....153

**Figura 4-43.** Comparación de la correlación lineal entre el incremento del ángulo de fricción  $\Delta\phi'$  y la VBP hallada por el método de Medley, y tendencias de otros autores. ....154

**Figura 4-44.** Correlación lineal entre el incremento del ángulo de fricción  $\Delta\phi'$  y la VBP hallada por el método de Medley – Datos obtenidos de mezclar esta investigación con los valores presentados por (Lindquist E. S., 1994). ....155

**Figura 4-45.** Correlación lineal y logarítmica entre la cohesión  $c'$  y la VBP hallada por el método de Nanclares. ....156

**Figura 4-46.** Correlación lineal entre la cohesión  $c'$  y la VBP hallada por el método de Medley. ....157

<b>Figura 4-47.</b> Correlación lineal entre el incremento de la cohesión $c'$ y la VBP hallada por el método de Medley.....	158
<b>Figura 4-48.</b> Correlación lineal entre la cohesión $c'$ y la VBP hallada por el método de Nanclares, para material 1 (superior izquierda), 2 (superior derecha), 3 (intermedio-superior izquierda), 4 (intermedio-superior derecha), 5 (intermedio-inferior izquierda), 6 (intermedio-inferior derecha), 7 (inferior izquierda) y 8 (inferior derecha). .....	160
<b>Figura 4-49.</b> Correlación lineal entre la cohesión $c'$ y la VBP hallada por el método de Medley, para material 1 (superior izquierda), 2 (superior derecha), 3 (intermedio-superior izquierda), 4 (intermedio-superior derecha), 5 (intermedio-inferior izquierda), 6 (intermedio-inferior derecha), 7 (inferior izquierda) y 8 (inferior derecha). .....	161
<b>Figura 4-50.</b> Correlación lineal entre el ángulo de fricción $\phi'$ y la VBP hallada por el método de Nanclares, para diferentes formas de bloques. ....	163
<b>Figura 4-51.</b> Correlación potencial entre el ángulo de fricción $\phi'$ y el $c_u$ . Se filtraron valores extremos de $C_u > 100$ .....	164
<b>Figura 4-52.</b> Correlación potencial entre el ángulo de fricción $\phi'$ y el $c_c$ . Se filtraron valores extremos de $C_c > 6$ .....	165
<b>Figura 4-53.</b> Correlación potencial entre la cohesión $c'$ y el $c_u$ . Se filtraron valores extremos de $C_u > 100$ . .....	166
<b>Figura 4-54.</b> Correlación potencial entre la cohesión $c'$ y el $c_c$ . Se filtraron valores extremos de $C_c > 6$ . .....	166
<b>Figura 4-55.</b> Trinchera excavada para ensayo en Distribuidora de Envigado. ....	167
<b>Figura 4-56.</b> Material típico encontrado en Distribuidora de Envigado. ....	168
<b>Figura 4-57.</b> Curvas Esfuerzo-Desplazamiento obtenidas en Distribuidora de Envigado. ....	169
<b>Figura 4-58.</b> Evidencia de la tortuosidad de la superficie de falla – E1 – Distribuidora de Envigado.....	169
<b>Figura 4-59.</b> Evidencia fotográfica ensayo E2 (izquierda) y E3 (derecha) – Distribuidora de Envigado.....	170
<b>Figura 4-60.</b> Condiciones iniciales - malla 3D (arriba) y resultados de la deformación horizontal (abajo) .....	171
<b>Figura 4-61.</b> Resultados calibración curvas obtenidas del ensayo in situ y generadas por el software Plaxis 3D Foundation – E1 (superior izquierda), E2 (superior derecha) y E3 (inferior) – Distribuidora de Envigado. ....	172



---

<b>Figura 4-62.</b> Trinchera excavada para ensayo en Finca Las Mercedes. ....	173
<b>Figura 4-63.</b> Material típico encontrado en Finca Las Mercedes. ....	174
<b>Figura 4-64.</b> Evidencia de la tortuosidad de la superficie de falla – E1 – Finca Las Mercedes. ....	174
<b>Figura 4-65.</b> Evidencia fotográfica ensayo E1 (izquierda) y E2 (derecha) – Finca Las Mercedes. ....	175
<b>Figura 4-66.</b> Curvas Esfuerzo-Desplazamiento obtenidas en Finca Las Mercedes. ....	175
<b>Figura 4-67.</b> Resultados calibración curvas obtenidas del ensayo in situ y arrojadas por el software – E1 (izquierda) y E2 (derecha) – Finca Las Mercedes. ....	176
<b>Figura 4-68.</b> Mapa geológico regional – Distribuidora de Envigado. ....	178
<b>Figura 4-69.</b> Material extraído del sitio “Distribuidora de Envigado”. Muestra N°1 (izquierda), Muestra N°2 (intermedio) y Muestra N°3 (derecha). ....	180
<b>Figura 4-70.</b> Bloques fallados en prueba de carga puntual – Distribuidora de Envigado. Muestra N°1 (izquierda), Muestra N°2 (intermedio) y Muestra N°3 (derecha). ....	184
<b>Figura 4-71.</b> Resultados límite matriz bloque para Muestra N°1 (superior-izquierda), Muestra N°2 (superior-derecha) y Muestra N°3 (inferior) usando la metodología de (Nanclares, 2018) – Distribuidora de Envigado. ....	186
<b>Figura 4-72.</b> Resultados VBP bloque para Muestra N°1 (superior), Muestra N°2 (intermedio) y Muestra N°3 (inferior) – Distribuidora de Envigado. ....	187
<b>Figura 4-73.</b> Mapa geológico regional – Finca Las Mercedes. ....	189
<b>Figura 4-74.</b> Material extraído del sitio “Finca Las Mercedes”. Fragmentos (izquierda), Muestra N°1 (intermedio) y Muestra N°2 (derecha). ....	190
<b>Figura 4-75.</b> Bloques fallados en prueba de carga puntual – Finca Las Mercedes. Muestra N°1 (izquierda) y Muestra N°2 (derecha). ....	193
<b>Figura 4-76.</b> Resultados límite matriz bloque para Muestra N°1 (superior-izquierda) y Muestra N°2 (superior-derecha), usando la metodología de (Nanclares, 2018) – Finca Las Mercedes. ....	194
<b>Figura 4-77.</b> Resultados VBP bloque para Muestra N°1 (superior) y Muestra N°2 (inferior) – Finca Las Mercedes. ....	195
<b>Figura 4-78.</b> Validación de la correlación lineal y potencial entre el ángulo de fricción $\phi'$ y la VBP hallada por el método de Nanclares. ....	196
<b>Figura 4-79.</b> Validación de la correlación lineal entre el ángulo de fricción $\phi'$ y la VBP hallada por el método de Nanclares, para diferentes formas de bloques. ....	197

<b>Figura 4-80.</b> Validación de la correlación potencial entre el ángulo de fricción $\phi'$ y el $c_u$ . (Cu<100).....	197
<b>Figura 4-81.</b> Validación de la correlación lineal entre el incremento del ángulo de fricción $\Delta\phi'$ y la VBP hallada por el método de Medley – Tendencia obtenida en esta investigación y conjugando con valores obtenidos por Lindquist. ....	198
<b>Figura 4-82.</b> Esquema del procedimiento seguido en la validación cruzada. ....	201
<b>Figura 4-83.</b> Ejemplo de coeficientes $R$ para diferentes nubes de puntos.....	202
<b>Figura 4-84.</b> Iteración N°17 de la Regresión N°1. $\phi_{\text{observado}}$ vs $\phi_{\text{simulado}}$ con datos de entrenamiento (superior-izquierda) y datos de prueba (superior-derecha), y regresión (inferior). ....	207
<b>Figura 4-85.</b> Regresión N°1. $\phi_{\text{observado}}$ vs $\phi_{\text{simulado}}$ (izquierda) y regresión (derecha) .....	208
<b>Figura 4-86.</b> Iteración N°19 de la Regresión N°2. $\phi_{\text{observado}}$ vs $\phi_{\text{simulado}}$ con datos de entrenamiento (superior-izquierda) y datos de prueba (superior-derecha), y regresión (inferior). ....	211
<b>Figura 4-87.</b> Regresión N°2. $\phi_{\text{observado}}$ vs $\phi_{\text{simulado}}$ (izquierda) y regresión (derecha) .....	211
<b>Figura 4-88.</b> Iteración N°9 de la Regresión N°3. $\phi_{\text{observado}}$ vs $\phi_{\text{simulado}}$ con datos de entrenamiento (superior-izquierda) y datos de prueba (superior-derecha), y regresión (inferior). ....	214
<b>Figura 4-89.</b> Regresión N°3. $\phi_{\text{observado}}$ vs $\phi_{\text{simulado}}$ (izquierda) y regresión (derecha) .....	215
<b>Figura 4-90.</b> Iteración N°45 de la Regresión N°4. $\phi_{\text{observado}}$ vs $\phi_{\text{simulado}}$ con datos de entrenamiento (superior-izquierda) y datos de prueba (superior-derecha), y regresión (inferior). ....	217
<b>Figura 4-91.</b> Regresión N°4. $\phi_{\text{observado}}$ vs $\phi_{\text{simulado}}$ (izquierda) y regresión (derecha) .....	218
<b>Figura 4-92.</b> Iteración N°28 de la Regresión N°5. $\phi_{\text{observado}}$ vs $\phi_{\text{simulado}}$ con datos de entrenamiento (superior-izquierda) y datos de prueba (superior-derecha), y regresión (inferior). ....	221
<b>Figura 4-93.</b> Regresión N°5. $\phi_{\text{observado}}$ vs $\phi_{\text{simulado}}$ (izquierda) y regresión (derecha) .....	221
<b>Figura 4-94.</b> Iteración N°33 de la Regresión N°6. $\phi_{\text{observado}}$ vs $\phi_{\text{simulado}}$ con datos de entrenamiento (superior-izquierda) y datos de prueba (superior-derecha), y regresión (inferior). ....	224
<b>Figura 4-95.</b> Regresión N°6. $\phi_{\text{observado}}$ vs $\phi_{\text{simulado}}$ (izquierda) y regresión (derecha) .....	225

## Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 3-1.</b> Codificación y fuentes bibliográficas de los materiales estudiados.....	90
<b>Tabla 4-1.</b> Características de los materiales estudiados. ....	113
<b>Tabla 4-2.</b> Límite matriz bloque para los materiales estudiados usando la metodología de (Medley E. , 1994). ....	121
<b>Tabla 4-3.</b> Comparativo entre las metodologías para determinar el límite entre matriz y bloque. ....	130
<b>Tabla 4-4.</b> VBP para los materiales estudiados usando la metodología de (Medley E. , 1994) y (Nanclares, 2018). ....	140
<b>Tabla 4-5.</b> Parámetros de resistencia $c'$ y $\phi'$ de los materiales estudiados.....	150
<b>Tabla 4-6.</b> Parámetros de rigidez y resistencia al corte obtenidos a partir del ensayo HCT – “Distribuidora de Envigado”. ....	172
<b>Tabla 4-7.</b> Parámetros de rigidez y resistencia al corte obtenidos a partir del ensayo HCT – “Finca Las Mercedes”. ....	177
<b>Tabla 4-8.</b> Resultados ensayo de densidad in situ – “Distribuidora de Envigado”.....	181
<b>Tabla 4-9.</b> Resultados forma de partículas – “Distribuidora de Envigado” .....	182
<b>Tabla 4-10.</b> Resultados ensayo de carga puntal – “Distribuidora de Envigado”.....	184
<b>Tabla 4-11.</b> Resultados ensayos de clasificación y propiedades índice – “Distribuidora de Envigado” .....	185
<b>Tabla 4-12.</b> Límite matriz bloque para las muestras extraídas de Distribuidora de Envigado, usando la metodología de (Medley E. , 1994). ....	186
<b>Tabla 4-13.</b> VBP para las muestras recuperadas de Distribuidora de Envigado, estudiados usando la metodología de (Medley E. , 1994) y (Nanclares, 2018). ....	188
<b>Tabla 4-14.</b> Resultados ensayo de densidad in situ – “Finca Las Mercedes” .....	190
<b>Tabla 4-15.</b> Resultados forma de partículas – “Finca Las Mercedes” .....	191

---

<b>Tabla 4-16.</b> Resultados ensayo de carga puntal – “Finca Las Mercedes” .....	192
<b>Tabla 4-17.</b> Resultados ensayos de clasificación y propiedades índice – “Finca Las Mercedes” .....	193
<b>Tabla 4-18.</b> Límite matriz bloque para las muestras extraídas de Finca Las Mercedes, usando la metodología de (Medley E. , The Engineering Characterization of Melanges and Similar Block-in-Matrix Rocks (Bimrocks), 1994).....	194
<b>Tabla 4-19.</b> VBP para las muestras recuperadas de Finca Las Mercedes, estudiados usando la metodología de (Medley E. , The Engineering Characterization of Melanges and Similar Block-in-Matrix Rocks (Bimrocks), 1994) y (Nanclares, 2018).....	195
<b>Tabla 4-20.</b> Resultados de la validación de las correlaciones propuestas.....	199
<b>Tabla 4-21.</b> Error promedio obtenido en la validación de las correlaciones propuestas.....	200
<b>Tabla 4-22.</b> Codificación y tipo de regresiones para validación cruzada aleatoria.....	203
<b>Tabla 4-23.</b> Datos usados en la validación cruzada aleatoria por regresión.....	203
<b>Tabla 4-24.</b> Resultados validación cruzada aleatoria para la regresión N°1.....	205
<b>Tabla 4-25.</b> Resultados validación cruzada aleatoria para la regresión N°2.....	208
<b>Tabla 4-26.</b> Resultados validación cruzada aleatoria para la regresión N°3.....	212
<b>Tabla 4-27.</b> Resultados validación cruzada aleatoria para la regresión N°4.....	215
<b>Tabla 4-28.</b> Resultados validación cruzada aleatoria para la regresión N°5.....	218
<b>Tabla 4-29.</b> Resultados validación cruzada aleatoria para la regresión N°6.....	222
<b>Tabla 4-30.</b> Regresiones propuestas en esta investigación. ....	226

## Lista de Símbolos y Abreviaturas

<i>HCT</i>	Hydraulic Cylinder Test (Ensayo de cilindro hidráulico)
<i>VBP</i>	Volumetric Block Proportion (Proporción volumétrica de bloques)
<i>CPT</i>	Cone Penetration Test (Prueba de penetración en cono)
<i>SPT</i>	Standard Penetration Test (Ensayo de penetración estándar)
<i>VST</i>	Vane Shear Test (Ensayo de corte con veleta)
<i>PMT</i>	Pressuremeter Test (Ensayo presiométrico)
<i>DMT</i>	Flat Dilatometer Test (Ensayo de dilatómetro)
<i>PBP</i>	Pre-Boring Pressuremeter (Ensayo presiométrico con sonda pre-perforante)
$c'$	Cohesión efectiva
$\varphi'$	Ángulo de fricción efectiva
<i>bimsoil</i>	Block in matrix soil (Bloques en matriz de suelo)
<i>bimrock</i>	Block in matrix rock (Bloques en matriz de roca)
<i>ZODME</i>	Zona de manejo de escombros y material de excavación
$E_{block}$	Módulo de elasticidad de los bloques
$E_{matrix}$	Módulo de elasticidad de la matriz
$\varphi_{weakest\ block}$	Ángulo de fricción del bloque más débil
$\varphi_{matrix}$	Ángulo de fricción de la matriz
<i>bims</i>	Bloques en matriz, sea de suelo o roca
<i>1D</i>	Una dimensión
<i>2D</i>	Dos dimensiones
<i>3D</i>	Tres dimensiones
$d_{mod}$	Máxima dimensión observable de bloque de un bimrock
$d_{peak}$	Tamaño de bloque asociado al pico del histograma log-log que relaciona la frecuencia relativa y tamaño del bloque
$D$	Dimensión fractal (Ver 2.2.2)
$\sqrt{A}$	Raíz cuadrada del área de estudio del bimrock analizado
$L_c$	Longitud característica
$F$	Fracción estudiada para obtener el límite matriz/bloque por el método de Nanclares (Ver 2.2.2)
$N_F$	Número de partículas de la fracción estudiada para obtener el límite matriz/bloque por el método de Nanclares (Ver 2.2.2)
$\%F$	Porcentaje en peso asociado a la fracción F (Ver 2.2.2)
$W$	Peso total de la muestra (Ver 2.2.2)
$W_F$	Peso de una partícula de la fracción F (Ver 2.2.2)
$A_s$	Área superficial del bloque (Ver 2.2.2)

---

$A_t$	Área transversal del bloque (Ver 2.2.2)
$S_F$	Sumatoria acumulada de las áreas superficiales de la fracción F (Ver 2.2.2)
$T_F$	Sumatoria acumulada de las áreas transversales de la fracción F (Ver 2.2.2)
$P_P$	Densidad de puntos (Ver 2.2.3)
$L_L$	Proporción lineal de bloques (Ver 2.2.3)
$A_A$	Proporción areal de bloques (Ver 2.2.3)
$V_V$	Proporción volumétrica de bloques (Ver 2.2.3)
$d_{max}$	Diámetro del bloque mayor según Medley (Ver 2.2.3)
$RVE$	Elemento de volumen representativo (Ver 2.2.3)
$\sigma$	Desviación estándar (Ver 2.2.3)
$COV$	Coficiente de variación normalizado (Ver 2.2.3)
$E[VBP]$	Proporción volumétrica de bloques promedio (Ver 2.2.3)
$L$	Longitud de las líneas de muestreo (Ver 2.2.3)
$D$	Diámetro promedio de bloques (Ver 2.2.3)
$V_f$	Fracción volumétrica de bloques (Ver 2.2.3)
$c_u$	Coficiente de uniformidad
$c_c$	Coficiente de curvatura
<i>bimtest</i>	Ensayo para caracterizar bimsoils (Ver 2.2.4)
<i>UCS</i>	Resistencia a la compresión simple
<i>EBP</i>	Proporción equivalente de bloques
$UCS_{max\_bloc}$	Resistencia a la compresión simple del bloque más fuerte (Ver 2.2.4)
$UCS_{bim}$	Resistencia a la compresión simple de los bimsoils
$A$	Parámetro para hallar la resistencia al corte de los bims (Ver 2.2.4)
$L'$	Longitud de línea tortuosa (Ver 2.2.4)
$L_0$	Longitud de línea lisa (Ver 2.2.4)
$A$	Áncho promedio de la rugosidad (Ver 2.2.4)
<i>JRC</i>	Join Roughness Coefficient (Coficiente de rugosidad de la junta)
$\alpha$	Ángulo de reposo del material
$D_{10}$	Diámetro o tamaño por debajo del cual queda el 10% del suelo, en peso
$D_{30}$	Diámetro o tamaño por debajo del cual queda el 30% del suelo, en peso
$D_{50}$	Diámetro o tamaño por debajo del cual queda el 50% del suelo, en peso
$D_{60}$	Diámetro o tamaño por debajo del cual queda el 60% del suelo, en peso
$D_{75}$	Diámetro o tamaño por debajo del cual queda el 75% del suelo, en peso
$D_{90}$	Diámetro o tamaño por debajo del cual queda el 90% del suelo, en peso
<i>EPM</i>	Empresas Públicas de Medellín E.S.P.

---

$\Delta VBP$	Variación porcentual de la VBP obtenida por el método de Medley y Nanclares (Ver 4.3)
$VBP_{Medley}$	Proporción volumétrica de bloques obtenida utilizando la metodología de Medley (1994) (Ver 4.3)
$VBP_{Nanclares}$	Proporción volumétrica de bloques obtenida utilizando la metodología de Nanclares (2018) (Ver 4.3)
$R^2$	Coefficiente de determinación
$R$	Coefficiente de Pearson
$RMSE$	Root Mean Square Error (Error cuadrático medio)
$\Delta\varphi$	Variación entre el $\varphi_{bim}$ y el $\varphi_{matrix}$
$\varphi_{bim}$	Ángulo de fricción del bimsoil
$\varphi_{matrix}$	Ángulo de fricción de la matriz
$\Delta c$	Variación entre la $c_{bim}$ y el $c_{matrix}$
$c_{bim}$	Cohesión del bimsoil
$c_{matrix}$	Cohesión de la matriz
$q_u$	Esfuerzo máximo que resiste el bim ensayado
$\sigma$	Esfuerzo aplicado al suelo
$I_{s50}$	Índice de resistencia de carga por punta para un espécimen de 50mm de diámetro
$w$	Humedad natural de suelos
$LL$	Límite líquido
$LP$	Límite plástico
$LL$	Índice de plasticidad
$AASHTO$	Sistema de clasificación de suelos de la American Association of State Highway and Transportation Officials
$USCS$	Sistema de Clasificación Unificado de Suelos
$G_s$	Gravedad específica de los sólidos
$GW$	Grava bien gradada
$GP$	Grava mal gradada
$CH$	Arcilla de alta plasticidad





# Capítulo 1

## 1. Introducción

### 1.1 Planteamiento del problema

En la naturaleza existen geomateriales que se encuentran conformados por una mezcla entre bloques de roca (en algunos casos gravas), de diversos tamaños y formas, embebidos en una matriz de suelo. Estos materiales se caracterizan por ser usualmente masas heterogéneas que exhiben un fuerte contraste en la resistencia entre los bloques (resistencia alta) y la matriz (resistencia baja). Algunos autores han acuñado el término *bimsoil* o *bimrock* para definir estas mezclas de roca (Medley E. , 2008), (Kalender, Sonmez, Medley, Tunusluoglu, & Kasapoglu, 2014); en donde el geomaterial se encuentra conformado por bloques embebidos en matriz. Si la matriz es suelo, se usa el primer término; mientras que, si es roca blanda, se usa el segundo.

Existen diferentes procesos que pueden dar origen a geomatas con presencia de bloques embebidos en una matriz de suelo. Los mecanismos pueden incluir la erosión, transporte y sedimentación de partículas (depósitos aluviales, aluvio-torrenciales, coluviales, glaciales, etc.), o la meteorización de la roca in-situ, dando lugar a lo que se conoce como suelo tropical.

De acuerdo con lo anterior, se observa que el material de estudio se encuentra de múltiples formas en la naturaleza, presentando diferentes características en función de su origen.

De acuerdo a este, las masas conformadas por mezclas de bloques embebidos en matriz de suelo pueden exhibir gran variedad de configuraciones, variando su granulometría, la forma de los bloques (angular, subangular, redondeado y subredondeado), la proporción de bloques en volumen (*VBP* por sus siglas en inglés), las características de la matriz (friccionante o cohesiva), entre otros. Cada una de estas características tiene un efecto en el comportamiento geomecánico del conjunto, por lo que la resistencia del material puede ser muy variable.

Por otro lado, debido a las características mencionadas de las mezclas suelo –bloques de roca (masas heterogéneas con zonas de alto contraste de la resistencia), la caracterización geotécnica de las mismas es una tarea de alta complejidad y dificultad (Medley & Lindquist, 1995). Para estos materiales, los métodos implementados convencionalmente, en muchos casos no se pueden aplicar o arrojan resultados poco confiables.

Ejemplo de ello es que pruebas de caracterización geotécnica in situ, tales como el ensayo de penetración con cono, el ensayo de penetración estándar (*CPT* y *SPT* por sus siglas en inglés, respectivamente) y sus variaciones, dan buenos resultados en la matriz, pero arrojan rechazo al encontrar los bloques de roca. De manera similar el ensayo de corte con veleta (*VST* por sus siglas en inglés) también presenta buen comportamiento en la matriz, pero es inútil al encontrar los bloques. Otro ensayo útil en la matriz, pero que por el tamaño del equipo puede arrojar resultados poco confiables en suelos con bloques, es el dilatómetro plano de Marchetti (*DMT* por sus siglas en inglés). De las técnicas in situ, el que mejores resultados presenta en matriz y bloque es el de los presiómetros con sondeo previo (*PBP* por sus siglas en inglés), pudiéndose usar en gran variedad de materiales (Ver Figura 1-1); sin embargo estos ensayos no siempre están disponibles y no son de uso común en el medio.

APLICABILIDAD: A = alta, B = media, C = baja, -= ninguna

Grupo	Tipo	Parámetros del Suelo												Tipo de Terreno							
		Tipo Suelo	Estratigrafía	u	* $\psi'$	$S_u$	DR%	$m_v$	$G_v$	k	$G_0$	$\sigma'_h$	OCR	$\sigma'_e$	Roca dura	Roca blanda	Grava	Arena	Limo	Arcilla	Orgánicos
Penetrómetros	Dinámico	C	B	-	C	C	C	-	-	-	C	-	C	-	-	C	B	A	B	B	B
	SPT	A	B	-	C	C	B	-	-	-	C	-	C	-	-	C	B	A	A	A	A
	CPT mecánico	B	AB	-	C	C	B	C	-	-	C	C	C	-	-	C	C	A	A	A	A
	CPT eléctrico	B	A	-	C	B	AB	C	-	-	B	BC	B	-	-	C	C	A	A	A	A
	CPTU	A	A	A	B	B	AB	B	AB	B	B	BC	B	C	-	C	-	A	A	A	A
	CPT/CPTU sísmico	A	A	A	B	AB	AB	B	AB	B	A	B	B	B	-	C	-	A	A	A	A
	Punta resistividad	B	B	-	B	C	A	C	-	-	-	-	-	-	-	C	-	A	A	A	A
	Dilatómetro Plano (DMT)	B	A	C	B	B	C	B	-	-	B	B	B	C	C	C	-	A	A	A	A
Presiómetros	Con sondeo previo (PBP)	B	B	-	C	B	C	B	C	-	B	C	C	C	A	A	B	B	B	A	B
	Autoperforante (SBP)	B	B	A <sup>1</sup>	B	B	B	B	A <sup>1</sup>	B	A <sup>2</sup>	AB	B	AB	-	B	-	B	B	A	B
	Hinca (FDP)	B	B	-	C	B	C	C	C	-	A <sup>2</sup>	C	C	C	-	C	-	B	B	A	A
Otros	Vane-Test (FVT)	B	C	-	-	A	-	-	-	-	-	BC	B	-	-	-	-	-	-	A	B
	Placa de Carga	C	-	-	C	B	B	B	C	C	A	C	B	B	B	A	B	B	A	A	A
	Placa helicoidal (screw plate)	C	C	-	C	B	B	B	C	C	A	C	B	-	-	-	-	A	A	A	A
	Permeabilidad en sondeos	C	-	A	-	-	-	-	B	A	-	-	-	-	-	A	A	A	A	A	A
	Fracturación hidráulica	-	-	B	-	-	-	-	C	C	-	B	-	-	B	B	-	-	C	A	C
	Cross hole/Down hole/Sísmica	C	C	-	-	-	-	-	-	-	A	-	B	-	A	A	A	A	A	A	A

Figura 1-1. Aplicabilidad de diferentes ensayos geotécnicos in-situ. Tomado de (Gómez P., 2017) después de (Bowles, 1997).

Para el caso de ensayos en laboratorio de materiales conformados por matriz y bloques, se tienen dos grandes retos. Por un lado, la toma de muestras de buena calidad para obtener testigos es una tarea difícil. Las técnicas más comunes para esto son la de toma de muestras de cajón y en tubo de pared delgada o shelby. La primera, dependiendo de qué tan cohesiva sea la matriz, puede arrojar resultados satisfactorios, aunque es una tarea ardua, que requiere de mucho cuidado en el tallado y manejo de la muestra. La segunda técnica, la cual se caracteriza por ser más rápida y efectiva, no se puede implementar en este tipo de materiales. Lo anterior es debido a la presencia de bloques, los cuales no permiten que se hinque en el terreno el tubo shelby.

Por otro lado, los equipos usados convencionalmente para evaluar la resistencia al corte de los materiales (corte directo o compresión triaxial), presentan la limitante de que, las

normas para ensayo establecen que para que la muestra se considere representativa, el tamaño de la dimensión característica del equipo, siendo esta el diámetro de la cámara de compresión triaxial, o el lado/diámetro (según la forma) de la caja de corte, debe ser al menos entre seis (6) y diez (10) veces el tamaño de la partícula máxima de la muestra a ensayar.

Este factor de escala varía según el tipo de prueba, siendo seis (6) para el ensayo triaxial (Ver (ASTM Designation: D7181-11, 2011), (ASTM Designation: D4767-11, Reapproved 2004), (ASTM Designation: D2850-15, Reapproved 2007)) y diez (10) para el corte directo (Ver (ASTM Designation: D3080-04, Reapproved 2004)). Debido a lo anterior es que, para caracterizar estos materiales, se requiere el uso de equipos de grandes dimensiones y capacidad de carga.

Según lo expuesto anteriormente, se concluye que las mezclas suelo-bloques de roca se encuentran abundantemente en la naturaleza, presentando múltiples orígenes, y, por ende, gran variabilidad en sus características y resistencia. Dada la heterogeneidad y el contraste en la resistencia que se puede encontrar en estas geomallas, las técnicas convencionales de caracterización in situ y en laboratorio, no son aplicables u ofrecen resultados poco confiables.

Con base en la problemática descrita se ha establecido como tema específico para el presente trabajo el de: "Establecer una relación entre ciertos aspectos físicos (forma de los bloques, VBP y gradación) con la resistencia al corte de mezclas de suelo y bloques de roca".

## **1.2 Justificación**

La caracterización geotécnica de los geomateriales es una de las principales tareas de cualquier proyecto de ingeniería. Lo anterior se debe a que todas las obras de infraestructura (edificios, torres de transmisión, presas, llenos, vías, túneles, etc.) interactúan de alguna forma con ellos, sean material tipo suelo o roca.

La interacción de los geomateriales con la estructura depende de la obra y, por ende, es necesario conocer diferentes aspectos del comportamiento geomecánico. Por ejemplo, en edificios, cobra gran importancia el material sobre el cual se fundará, ya que de él depende la capacidad portante y los asentamientos que experimentará la cimentación. En este caso es relevante conocer las propiedades inalteradas de la geomasa, tales como parámetros de resistencia y rigidez.

Para el caso de túneles y excavaciones subterráneas, dado que el geomaterial es el principal elemento de soporte, también se deben conocer aspectos de resistencia y rigidez del macizo o el suelo, teniendo en cuenta el efecto que pueda generar sobre este, la excavación y/o el método constructivo aplicado. Para estructuras como presas y llenos, las cuales son construidas usando el suelo o la roca como materia prima, las propiedades del material remoldeado son las de principal interés, ya que, durante el proceso de extracción, transporte y colocación, el suelo o la roca cambia considerablemente sus propiedades geomecánicas.

Con base en lo anterior, se observa la importancia de entender el comportamiento mecánico del material usado en las obras de infraestructura (suelo y/o roca), ya que de este conocimiento depende en gran parte el éxito o fracaso del proyecto. Sin embargo, existen geomateriales que, por sus características, tienen grandes dificultades para su adecuada caracterización. Entre ellos se encuentran las mezclas suelo-bloques de roca, las cuales, según se explicó en la sección anterior, presenta múltiples retos.

Para superar las dificultades en la caracterización de estos materiales, en algunos casos se recurre a realizar ensayos sobre la matriz, excluyendo el aporte de los bloques en la resistencia de todo el conjunto. Este aporte en algunos casos puede ser de gran importancia, conllevando a aumentos considerables en los parámetros de resistencia al corte, como se demuestra en algunas investigaciones realizadas por autores como (Medley E. , 1994) (Lindquist & Goodman, 1994) (Sonmez, Gokceoglu, Medley, Tuncay, & Nefeslioglu, 2006) (Kalender, Sonmez, Medley, Tunusluoglu, & Kasapoglu, 2014).

Otra práctica usada en el medio es la de buscar valores de referencia en la literatura. Estos valores se sugieren con base en estudios realizados en otros proyectos o investigaciones,

y sobre distintos materiales. Sin embargo, como ya se mencionó, las mezclas suelo-bloques de roca se caracterizan por presentar una heterogeneidad aun mayor por la existencia de los bloques de roca, por lo que los valores hallados para un proyecto, pueden no aplicar en otros. Lo anterior puede conducir a sobrestimar o subestimar la resistencia del material, obteniendo diseños subdimensionados e inseguros en el primero de los casos o, en el caso de subestimar la resistencia, diseños sobredimensionados. Actualmente se han propuesto diferentes formas de evaluar las propiedades mecánicas de los materiales, las cuales están en proceso de estandarización.

En cualquiera de los casos anteriores, es imperativo, para garantizar una correcta práctica ingenieril, mejorar el entendimiento del comportamiento geomecánico de las mezclas suelo-bloques de roca, de tal forma que estas se puedan caracterizar con un mayor nivel de confianza y que así las obras se puedan construir de manera eficiente y segura.

### **1.3 Objetivo general**

El objetivo general del trabajo de investigación es determinar la influencia de la forma, la proporción volumétrica de bloques y la gradación, en la resistencia al corte de las mezclas de suelo-bloques de roca.

### **1.4 Objetivos específicos**

Entre los objetivos específicos de la investigación se encuentran:

- Comparar las metodologías propuestas por (Medley E. , 1994) y (Nanclares, 2018) para determinar el límite entre matriz y bloque.
- Establecer correlaciones entre la textura de los *bimsoils* (gradación, forma y proporción volumétrica de bloques) y su resistencia al corte.

- Validar las tendencias y correlaciones obtenidas a partir de ensayos HCT sobre material in-situ.

## 1.5 Alcance

El presente trabajo de investigación es de carácter experimental y analítico. Se realizarán ensayos en campo, no convencionales (i.e. que no son de común uso en la ingeniería y no se encuentran regulados por organismos nacionales o internacionales como la ASTM), tipo *HCT (Hydraulic Cylinder Test)* (González-Nicieza, Prendes-Gero, Fernandez-Rodriguez, & Lopez-Gayarre, 2013); y se usarán resultados existentes de pruebas no convencionales; entre los que se incluyen ensayos de corte directo y compresión triaxial de grandes dimensiones. Los ensayos de laboratorio usados, se realizaron sobre muestras remoldeadas.

Se utilizará en gran parte información preexistente, sobre la que no se tiene el control de las variables de interés o que pueden afectar la resistencia, lo cual se considerará en el procesamiento de los datos. Adicionalmente, debido a las características del material estudiado, los ensayos que se llevarán a cabo y los ya realizados, no se encuentran estandarizados por ningún organismo. Por lo tanto, es posible que haya efectos propios del modo de falla del ensayo implementado (rata de aplicación de la carga, generación de presiones de poros, estado tensorial del material, etc.), que influyeran en los resultados obtenidos. Para disminuir el efecto de estas variables, se procuró que los datos recopilados y los ensayos realizados siguieran las indicaciones y recomendaciones de las normativas que rigen las pruebas convencionales de resistencia (compresión triaxial y/o corte directo).

De acuerdo a lo anterior, los ensayos triaxiales compilados se realizaron en condiciones consolidadas drenadas, de tal forma que se obtuvieron parámetros de resistencia efectivos. De igual forma, en el ensayo *HCT* se seleccionó una rata de aplicación de carga en función del material estudiado, garantizando que el ensayo se realizase en unas condiciones drenadas. También, se buscó que la aplicación de la carga durante el ensayo se hiciera de manera ortogonal al terreno, de tal forma que no se generasen esfuerzos cortantes.

Por otro lado, se tiene la limitante del tamaño máximo de partícula que es permitido por las normas que rigen los ensayos convencionales (corte directo y compresión triaxial). Si se siguen estas recomendaciones, las muestras a ensayar estarán muy restringidas en cuanto a proporción de bloques se refiere, el cual es una de las propiedades que se considera tiene influencia en la resistencia. Lo anterior, sin mencionar la escasez de equipos de grandes dimensiones en el ámbito nacional.

## 1.6 Contenido

El documento se ha organizado de la siguiente manera. En el Capítulo 1 se presenta la introducción, planteamiento del problema, objetivos y alcance del estudio. En él se mencionan temas como los posibles orígenes y características del material de interés, las dificultades que se presentan al realizar proyectos con estos materiales y las metas que se pretenden alcanzar con la investigación.

En el Capítulo 2 se habla sobre los antecedentes y el marco teórico, haciendo énfasis en el enfoque de los *bims*; el cual ha buscado relacionar la resistencia al corte de estos materiales, con propiedades físicas como la proporción volumétrica de bloques *VBP*, densidad, gradación, forma y orientación de los bloques, etc.

En el Capítulo 3 se presenta la metodología y actividades realizadas para alcanzar las metas propuestas en el presente trabajo. Se describen los ensayos realizados y la información recopilada en la investigación.

En el Capítulo 4 se presentan los resultados de la investigación realizada; en donde se incluye la determinación del límite matriz/bloque, la definición de la proporción de bloques y los parámetros de resistencia al corte de los geomateriales analizados. Finalmente se muestra la relación encontrada entre las propiedades físicas y los parámetros de resistencia al corte; al igual que la validación de estas correlaciones a partir de ensayos en campo.



En el Capítulo 5 se consignan las conclusiones. Finalmente, en el capítulo 6 y 7 se presentan los anexos y referencias bibliográficas, respectivamente.

## Capítulo 2

### 2. Antecedentes y Marco Teórico

En este capítulo se presentan los antecedentes y estado del arte sobre el tema investigado; es decir, los *bimsoils*. El enfoque se aborda desde dos frentes; uno desde el origen del material, en donde se explica desde la geología, cómo se puede conformar materiales compuestos por bloques de roca embebidos en matriz de suelo. En esta sección se habla de orígenes como depósitos aluviales y aluvio-torrenciales, depósitos de vertiente, depósitos glaciares, ciertos horizontes de un suelo tropical y llenos antrópicos.

El otro frente se enfoca en explicar, desde la mecánica de suelos y rocas, las diferentes metodologías y enfoques que se han planteado para entender y predecir el comportamiento geomecánico de los *bimsoils*. En este sentido, se destacan trabajos que han relacionado la resistencia al corte de estos materiales con propiedades como la densidad, la gradación, la forma, orientación y proporción volumétrica de los bloques, entre otros.

#### 2.1 Origen de los materiales estudiados

Como se mencionó anteriormente, el origen de geomateriales compuestos por bloques de roca embebidos en suelo es múltiple. Estos, pueden ser tanto transportados, como tener un origen in situ.

En general, es más común que los *bimsoils* sean conformados a partir de depósitos, generados por agentes como el agua, la gravedad, el hielo o el ser humano. Dentro del contexto regional, los *bimsoils* se encuentran asociados principalmente a depósitos de vertiente que moldearon las laderas de la zona, o en depósitos aluviales y aluvio-torrenciales en torno a los ríos y quebradas.

A continuación, se expone con detalle cada uno de los orígenes mencionados.

### 2.1.1 Depósitos aluviales y aluvio-torrenciales

Son aquellos generados por la acción de una corriente de agua. Ésta inicialmente transporta el material y posteriormente lo deposita en un proceso de sedimentación (Hoyos Patiño, 2012).

De acuerdo con la energía del cauce, puede variar el tamaño de las partículas, pudiéndose presentar eventos torrenciales en la cual la corriente arrastre grandes bloques de roca. Tras ser conformado el depósito aluvial, eventualmente éste puede continuar siendo afectado por las dinámicas del río, el cual va llenando los vacíos que presenta el depósito con material más fino transportado durante eventos. También existen procesos de migración vertical de partículas que finalmente, pueden originar un depósito en donde bloques de roca o gravas, se encuentren embebidos en una matriz de un material más fino. En la Figura 2-1 se presentan ejemplos de estos depósitos.



**Figura 2-1.** Ejemplos de depósitos aluviales con mezclas de bloques de roca y suelo. Tomado de (Ayala, 2019).

Finalmente, en ambientes tropicales, la matriz original (arena o gravas finas) se deteriora a una mayor velocidad, por lo que pasa a ser un material fino; lo que se conoce como depósitos aluviales o aluviotorrenciales meteorizados.

### 2.1.2 Depósitos de vertiente

Son masas de suelo que fueron transportadas desde el lugar donde se originaron, por acción de la gravedad, flujos de agua lluvia o deslizamiento (Bates & Jackson, 1980). Este tipo de depósito se caracteriza por ser de gran heterogeneidad. Dependiendo del mecanismo que le dio origen, puede variar la composición y granulometría de éste, presentándose característicamente como mezclas de bloques de forma angular o subangular, embebidos en una matriz de carácter más fino. En la Figura 2-2 se muestran algunos ejemplos.



**Figura 2-2.** Ejemplos de depósito de vertiente en Robledo - Medellín (Arriba) y Tarso – Antioquia, con mezclas de bloques de roca y suelo. Elaboración propia.

### 2.1.3 Depósitos glaciares

Se denomina de esta manera al material transportado por acción de un glaciar. Están formados por la mezcla desordenada de partículas, presentando gran variedad de tamaños (Hoyos Patiño, 2012). En la Figura 2-3 se presentan ejemplos de estos depósitos.



**Figura 2-3.** Ejemplos de depósitos glaciares con mezclas de bloques de roca y suelo. Tomado de (Ayala, 2019).

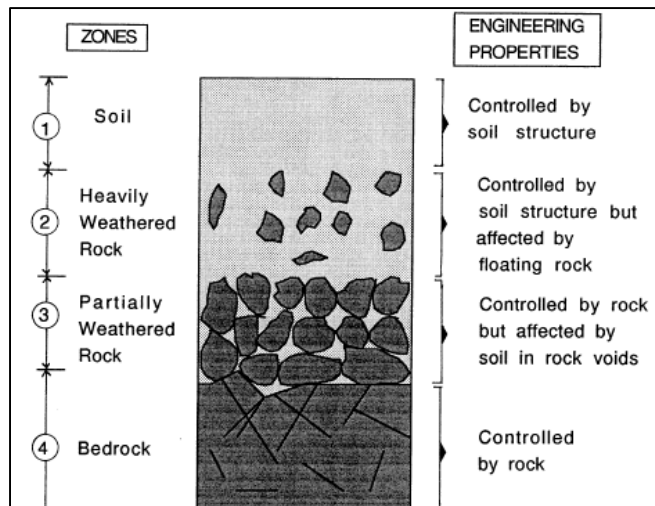
### 2.1.4 Suelo tropical

El suelo tropical es aquel que ha sido generado por la meteorización química y/o física de la roca. Es un material que no ha sido transportado por algún agente (agua, aire, gravedad, animales o el hombre).

Dependiendo del grado de meteorización, la composición de estos suelos es variable. Cuando el grado de meteorización es tal que no se ha presentado la descomposición total del macizo rocoso, se pueden conformar horizontes en donde los bloques de roca se encuentren embebidos en una matriz de suelo más fino.

De acuerdo con (Vallejo & Mawby, 2000), cuando la roca está fuertemente meteorizada, la resistencia de la masa es controlado por la estructura del suelo, pero afectada por los bloques flotantes, tal como se muestra en la Figura 2-4. En la Figura 2-5 se presentan algunos ejemplos de este tipo de material.





**Figura 2-4.** Mezclas suelo-roca producto de la meteorización. Tomado de (Vallejo & Mawby, 2000).



**Figura 2-5.** Ejemplos de perfil de suelo tropical con intercalaciones de bloques de roca y suelo. Perfil de meteorización de (Deere & Patton, 1971) del Batolito antioqueño en El Peñol – Antioquia (Arriba) y meteorización esferoidal en Tarso – Antioquia (Abajo). Elaboración propia.

### 2.1.5 Lleno antrópico

Como su nombre lo indica, son aquellos depósitos que han sido conformados artificialmente por el hombre. Dependiendo del propósito del depósito (Zona de Manejo de Escombros y Material de Excavación (ZODME), llenos o terraplenes de vías, presas, etc.), este puede variar su composición. Sin embargo, en su mayoría se caracterizan por contener bloques embebidos en un material más fino. En la Figura 2-6 se presentan ejemplos de estos geomateriales.



**Figura 2-6.** Ejemplos de Lleno antrópico con mezclas de bloques de roca y suelo. Zodme El Tejar (Izquierda) y Zodme La Redonda (Derecha). Vía San Andrés de Cuerquia – Ituango.  
Elaboración propia.

## 2.2 Enfoque de los *Bims*

La palabra *bimrock* es un acrónimo del término “*block in matrix rocks*”, y se usa para designar “una mezcla de rocas, compuestas por una cantidad geotécnicamente significativa de bloques dentro de una matriz de textura más fina”. La expresión geotécnicamente significativa plantea que la cantidad, tamaño, volumen y contraste de resistencia entre los bloques y la matriz es tal que influyen en las propiedades del material, a la escala de interés (Medley E. , 2008).

El término block-in-matrix fue acuñado por el profesor Loren Raymond, siendo Medley el que usó el término *bimrock* por primera vez (Medley E. , 2008). Dentro de los *bimrocks* se puede hablar de dos grandes grupos, aquellos en donde la matriz se encuentra soldada, cementada o litificada; y aquellos donde la matriz no está soldada, es decir, es suelo. Este último es también llamado *bimsoil* por algunos autores (Kalender, Sonmez, Medley, Tunusluoglu, & Kasapoglu, 2014), y es el material sobre el cual se centra el presente trabajo investigativo.

Algunos autores han propuesto términos con base en el contraste de resistencia entre la matriz y los bloques, que si se cumplen, garantizan que la superficie de falla se presenta a lo largo de la matriz y esquivando los bloques, según se muestra en Figura 2-7.

Por ejemplo, (Lindquist E. S., 1994) seleccionó un criterio basado en relación o cociente entre la rigidez (módulo de Young) de los bloques y la rigidez de la matriz, la cual está dada por (Edmund & Dimitrios, 2011):

$$\frac{E_{block}}{E_{matrix}} \sim 2,0$$

Basados en los trabajos de diversos autores, Medley (Medley E. , 1994), propuso que el contraste requerido entre los bloques y la matriz para que la superficie de falla sea tortuosa, puede ser evaluado a partir del ángulo de fricción conforme con la siguiente expresión (Edmund & Dimitrios, 2011):

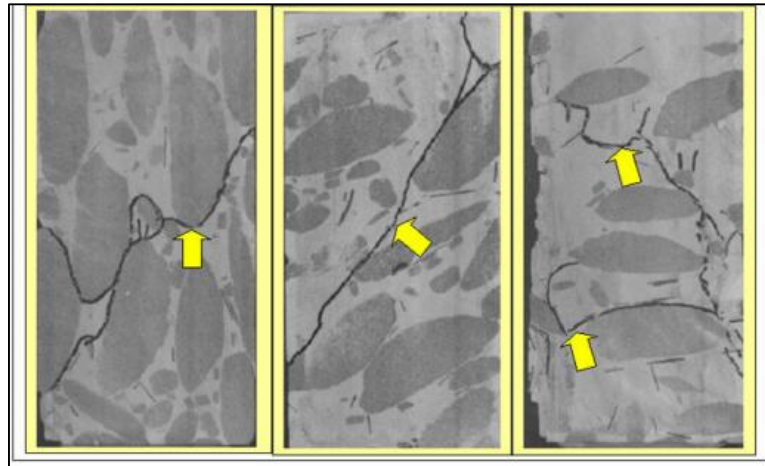
$$\frac{\tan \phi_{weakest\ block}}{\tan \phi_{matrix}} > 1,5 - 2,0$$

Sin embargo, dado que la resistencia de la roca es función tanto de la fricción como de la cohesión, y el contraste matriz-bloque también está influenciado por ambos componentes, el profesor Harun Sönmez propuso una relación entre la resistencia a la compresión inconfiada (*UCS*) de los bloques y la matriz (Edmund & Dimitrios, 2011):

$$\frac{UCS_{block}}{UCS_{matrix}} > 1,5$$



Para relaciones de resistencia por debajo de los criterios anteriores, existirá la posibilidad de que la superficie de falla pase a través de los bloques y no en torno a ellos.



**Figura 2-7.** Secciones a través de tres especímenes fallados por compresión triaxial de modelos físicos de Melanges, mostrando que la superficie de falla se presenta, rodeando de los bloques.

Tomado de (Medley E. , 2008).

Los *bimrocks/bimsoils* (*bims* de ahora en adelante) se pueden encontrar de múltiples formas en la naturaleza y en muchas partes del mundo. Algunos ejemplos de *bim's* son las rocas de falla, los melanges, los conglomerados, las mezclas de suelo rodeando núcleos frescos de roca, rocas meteorizadas, (Medley E. , 2008), depósitos de vertiente, depósitos aluviales, llenos antrópicos, entre otros (Ver Figura 2-8)



**Figura 2-8.** Ejemplos de bimsoils de diferentes orígenes. Depósito coluvial en San Andrés de Cuerquia – Antioquia (Arriba), depósito aluvial del río Medellín a la altura de Envigado - Antioquia (Intermedia) y lleno antrópico en la Avenida Regional a la altura de Envigado – Antioquia (Abajo).  
Elaboración propia.

### 2.2.1 Caracterización de los *Bims*

Los *bims* tienen alta variabilidad espacial, litológica y mecánica, por lo que la caracterización y el diseño en este tipo de materiales, es una tarea de gran complejidad (Kalender, Sonmez, Medley, Tunusluoglu, & Kasapoglu, 2014). Algunos ingenieros erróneamente asumen que adoptar las propiedades geomecánicas de, ya sea el suelo o los bloques de roca, es suficiente; lo cual conlleva errores (Medley E. , 2008). Un ejemplo de un caso de estudio en donde se evidencia el efecto de los *bims* en la resistencia al corte de los geomateriales es el diseño de la central Scott Dam. De acuerdo a (Goodman & Ahlgren, 2000), a partir de los ensayos realizados, se pudo determinar un ángulo de fricción ( $\varphi$ ) de la matriz igual a 22°; el cual incrementó a 39° al tener en cuenta el aporte de los bloques, lo que significa un aumento del 77%. Lo anterior muestra el error en el que se puede incurrir al solo trabajar con los valores obtenidos en la matriz.

Al trabajar con *bims*, uno de los principios más importantes es considerar la discontinuidad lateral y vertical de los materiales. Dentro de los elementos más importantes a caracterizar en un *bimrock* se encuentra: la proporción volumétrica de bloques *VBP*; la distribución del tamaño de los bloques; orientación de los bloques; resistencia de la matriz y resistencia de los contactos matriz/bloque; la litología de los bloques, de la matriz y la forma individual de los bloques, entre otros (Medley E. , 2008).

### 2.2.2 Definición límite entre matriz y bloque

Como se mencionó en el párrafo anterior, uno de los elementos más importantes para caracterizar un *bim* es hallar la proporción de bloques. Para ello, es necesario definir el límite que separa la matriz de los bloques. A continuación, se presenta las metodologías propuestas por algunos autores.

- **Metodología de Medley**

La metodología propuesta por (Medley E. , 1994) para determinar el tamaño límite que separa los bloques de la matriz, se basó en la investigación de (Lindquist E. , 1991), el cual



determinó que la distribución del tamaño de bloques de un afloramiento de un melange Franciscano de la playa de Caspar (Mendocino, California) era un *fractal* y luego replicó la distribución del tamaño de los bloques en modelos físicos de melanges, construidos por Medley ( (Medley E. , 1994), apud (Medley & Lindquist, 1995)).

El trabajo de (Medley E. , 1994) amplió lo realizado por (Lindquist E. , 1991), y determinó que la distribución del tamaño de bloques de una variedad de melanges Franciscanos a diferentes escalas era también fractal (apud (Medley & Lindquist, 1995)). La fractalidad de los melanges y otros *bims* significa que estos materiales conservan la *similaridad* a diferentes escalas; es decir que, si se selecciona un área de estudio y se determina la distribución del tamaño de bloques en él, esta va a ser similar si se toma un área mayor o menor. Esta propiedad es también conocida como *independencia de escala* y se conserva para escalas variando entre unos pocos centímetros a decenas de kilómetros (Kalender, Sonmez, Medley, Tunusluoglu, & Kasapoglu, 2014) (Ver Figura 2-9). La fractalidad es común en la naturaleza, evidenciándose no solo en los *bims*, sino también en fenómenos como terremotos, incendios naturales, erupciones volcánicas y deslizamientos (Turcotte, Malamud, Guzzetti, & Reichenbach, 2002) (Malamud, 2004).



**Figura 2-9.** Ejemplos de la independencia de la escala en el melange Franciscano. Tomado de (Medley E. , 2008).

Para comprobar la independencia de escala de los *bimrocks*, Medley investigó el melange Franciscano a través de medidas hechas en dos dimensiones (2D) (afloramientos, mapas y fotografías) y una dimensión (1D) (Perforaciones, núcleos y transversas de afloramientos o líneas de muestreo). Las medidas se procesaron con técnicas de análisis de imagen y haciendo uso de los principios de la estereología, la cual permite estimar parámetros geométricos en 2 y 3 dimensiones a partir de medidas en una dimensión (Medley E. , 1994).

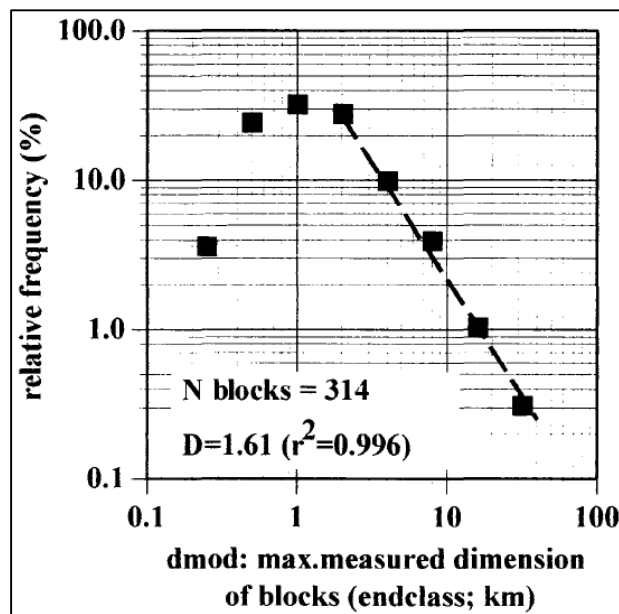


**Figura 2-10.** Bloques de un melange en la playa de Caspar. Se observa el  $d_{mod}$ , el cual sólo se mide de bloques completos  
Modificado de (Medley & Lindquist, 1995).

Medley, determinó la máxima dimensión observable " $d_{mod}$ " de 1900 bloques del melange franciscano. Esta dimensión es la longitud del mayor vector medido en una superficie de dos dimensiones (Ver Figura 2-10). El  $d_{mod}$  raramente coincide con el diámetro real del bloque, pero es la mayor distancia que se puede medir para un bloque que es cortado por una superficie. Medley complementó la base de datos utilizada en su investigación con medidas manuales obtenidas de mapas geológicos preparados a escalas entre 1:250000 y 1:4800 (Medley & Lindquist, 1995).

Además de obtener  $d_{mod}$  también se midió el área de estudio para cada imagen procesada o mapa analizado. Las áreas de estudio estuvieron en rangos de unos pocos centímetros cuadrados hasta 900 km<sup>2</sup>.

La información compilada se analizó agrupándola en clases de acuerdo con el tamaño del bloque ( $d_{mod}$ ). Las clases se seleccionaron de tal forma que el tamaño de bloque de la siguiente fuese el doble de la anterior. El número de bloques de cada clase fue contado y se graficó un histograma usando ejes *log-log*. En las ordenadas se muestra la frecuencia numérica relativa (número de bloques de la clase dividido por el total de bloques). En las abscisas se graficó el  $d_{mod}$ . Un ejemplo de los resultados obtenidos por Medley se presentan en la Figura 2-11.

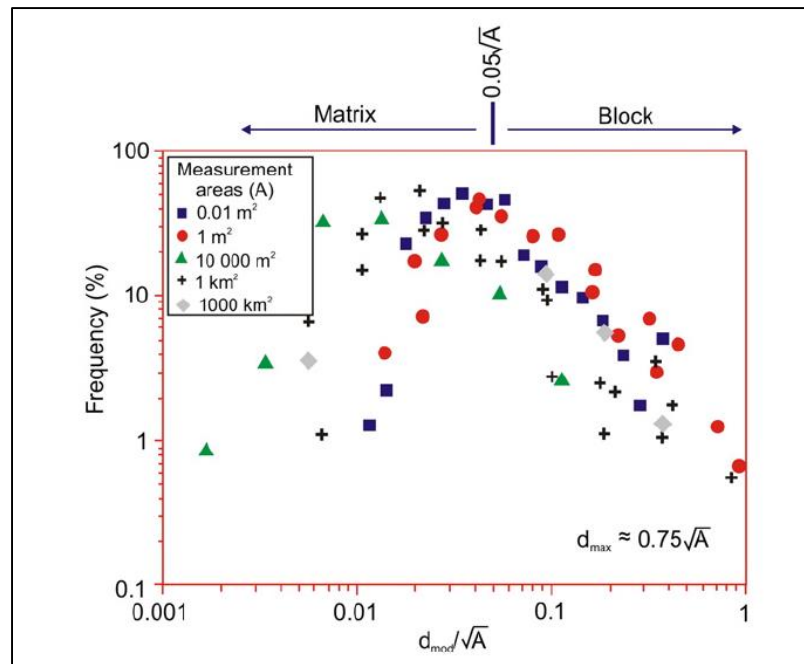


**Figura 2-11.** Histograma log-log obtenido por Medley, en donde se relaciona la frecuencia relativa y el tamaño de bloques de un Melange del Complejo Franciscano. Tomado de (Medley E. , 1994).

En la Figura 2-11 se observa un ramal ascendente, el cual es el resultado de subestimar el conteo de bloques, los cuales eran pequeños en relación a la escala de medida, y por ello fueron sub-representados. Hay un pico que muestra el número de bloques en el histograma log-log. El tamaño de bloque asociado al pico se define como  $d_{peak}$ . El ramal descendente con tendencia lineal indica que la distribución del tamaño de bloques es

*fractal*, o sigue una ley de potencia con un exponente negativo. La magnitud absoluta de la pendiente de la línea de tendencia es la dimensión fractal,  $D$ ; el cual es también el valor absoluto del exponente de la ley de potencia (Medley & Lindquist, 1995).

Los histogramas fueron comparados para demostrar que la similitud en la distribución de los bloques se conserva para diferentes escalas con más de 4 órdenes de magnitud de diferencia. Para esta comparación se normalizaron los histogramas dividiendo el tamaño de bloques  $d_{mod}$  por la raíz del área  $\sqrt{A}$  que contiene los bloques para cada fuente. Los resultados obtenidos por (Medley E. , 1994) se presentan en la Figura 2-12.



**Figura 2-12.** Distribución de bloques normalizada para identificar la independencia de la escala.

Tomado de (Kalender, Sonmez, Medley, Tunusluoglu, & Kasapoglu, 2014) después de (Medley E. , 1994).

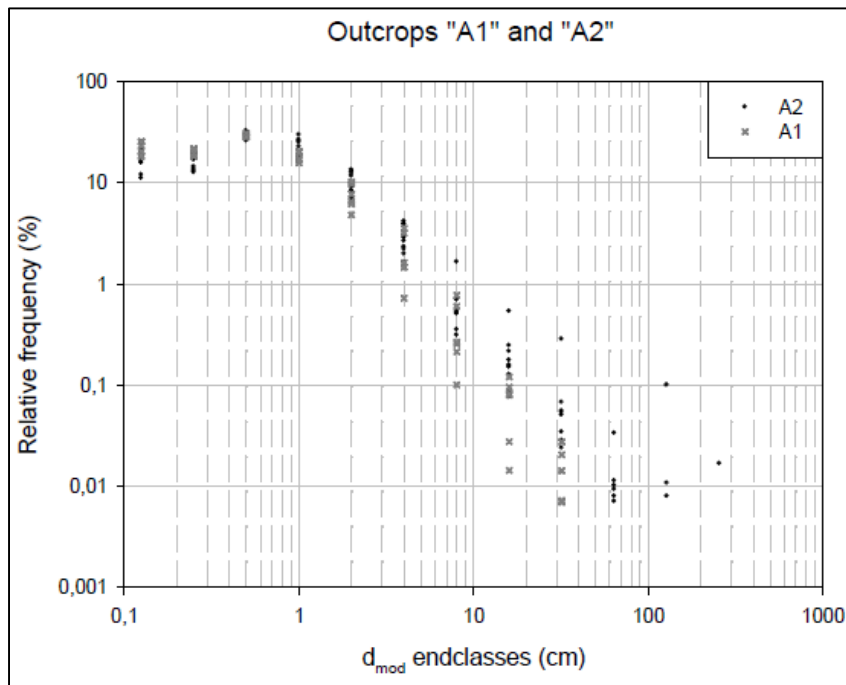
De los resultados de la Figura 2-12 se observa que la distribución del tamaño de bloques en los *bimrocks* es fractal, lo cual da indicio de un orden dentro de la estructura caótica observada preliminarmente.

Por otro lado, se evidencia la *independencia de la escala*, es decir, que se conserva una similitud en la distribución de tamaños para diferentes rangos de escala. Esto también

evidencia que el tamaño del bloque depende de la escala de trabajo, observándose que el tamaño para un volumen dado se encuentra entre  $0,75\sqrt{A}$  y  $0,05\sqrt{A}$ .

Bloques por encima de  $0,75\sqrt{A}$ , resultan en una disminuida proporción de matriz en el volumen considerado, por lo que el material se debe analizar más como una roca no mezclada compuesta principalmente por bloques (Medley & Zekkos, 2011). Bloques con un tamaño inferior a  $0,05\sqrt{A}$  constituyen más del 95% del número total de bloques para un volumen dado, pero contribuyen con menos del 1% de la proporción volumétrica de bloques; por lo que probablemente tengan una influencia despreciable en las propiedades mecánicas del *bim* bajo la escala ingenieril considerada (Medley & Lindquist, 1995).

La magnitud  $\sqrt{A}$  es generalizada por (Medley E. , 1994), como la longitud característica  $L_c$ , la cual puede ser la altura de un deslizamiento, el ancho de una fundación, la raíz cuadrada de un área de estudio, el ancho de un túnel, la base de una presa o el diámetro de un espécimen de laboratorio.



**Figura 2-13.** Histograma log-log obtenido por Coli et al, en donde se relaciona la frecuencia relativa y el tamaño de bloques de un Complejo Caliza-Esquisto de La Toscana. Tomado de (Coli, Berry, & Boldini, 2008).



Trabajos posteriores realizados por (Coli, Berry, & Boldini, 2008) en un Complejo Caótico de Esquisto-Calizas siguiendo la metodología de (Medley E. , 1994), arrojaron comportamientos similares en cuanto a la distribución del tamaño de bloques. Lo anterior se observó al graficar en un histograma *log-log* que relaciona el  $d_{mod}$  con la frecuencia relativa (Ver Figura 2-13), tal como lo propone (Medley E. , 1994). Los resultados muestran que el histograma tiene un ramal ascendente, un pico  $d_{peak}$  y un ramal descendente. Se observan algunas diferencias entre el  $d_{peak}$  hallado por (Medley E. , 1994) para el Complejo Franciscano y el encontrado por (Coli, Berry, & Boldini, 2008) para el Complejo en la Toscana. En el primer caso se observó que el  $d_{peak}$  era aproximadamente el  $0,05\sqrt{A}$ ; mientras que en el segundo estudio se encontró un valor de  $0,0025\sqrt{A}$ . Esta diferencia evidenciaría que el límite entre matriz y bloque no solo dependería de la longitud característica  $L_c$ ; sino que también se vería influenciado por la formación o el material como tal.

- **Metodología de Nanclares**

Para determinar la dimensión que separa los bloques de la matriz, (Nanclares, 2018) recurrió a la definición de *bimsoil*, la cual establece que la matriz se encuentra conformada por toda partícula menor que impide el contacto entre partículas mayores; es decir, las partículas mayores se encuentran aisladas y no entran en contacto entre ellas.

De acuerdo con lo anterior, la definición de matriz para *bimsoil* varía de un caso a otro en función de la granulometría del material. Este enfoque difiere del propuesto por Medley (Medley E. , 1994) (Medley & Lindquist, 1995), ya que el límite no depende del tamaño máximo del bloque o de la estructura a diseñar, sino que se orienta a identificar una dimensión máxima de partícula que corresponde a un tamaño que incide en el comportamiento del suelo porque aísla las partículas de mayor tamaño, restringiendo su aporte a la resistencia.

Conforme con esta definición, se propone que el tamaño máximo de la matriz corresponde a aquel en el cual la sumatoria del área superficial de las partículas mayores es igual a la sumatoria del área transversal de las partículas menores. Esto requiere tener conocimiento del número de partículas en cada rango de tamaños y su forma. Dadas las dificultades

para obtener estos parámetros, se realizaron algunas suposiciones: Se asumió que el suelo se encuentra conformado por esferas con igual densidad. De esta manera y conociendo la distribución granulométrica de la masa de suelo, puede conocerse el número de partículas que integran cada fracción, tal como se muestra en la ecuación 1.

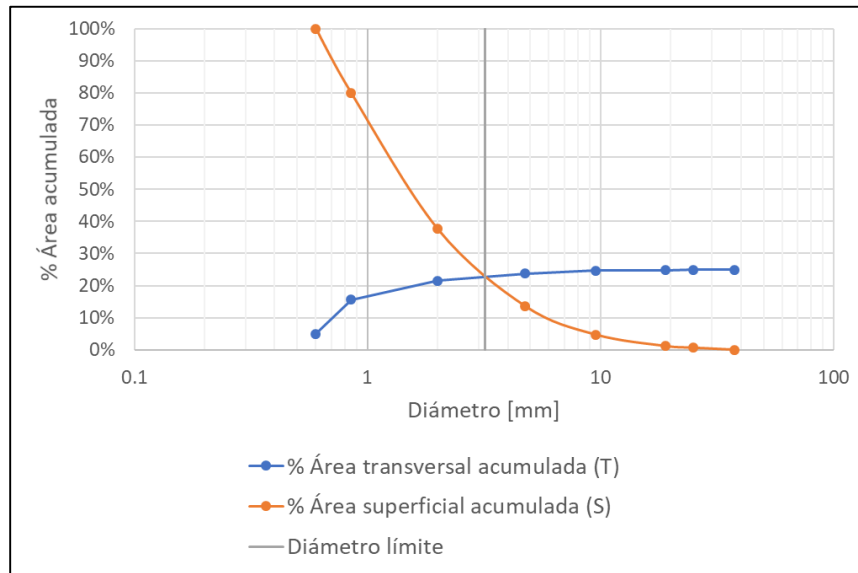
$$N_F = \frac{\%_F \times W}{W_F} \quad (1)$$

Dónde  $N_F$  representa el número de partículas de la fracción  $F$ ,  $\%_F$  es el porcentaje de peso asociado a la fracción  $F$ ,  $W$  es el peso total de la muestra y  $W_F$  es el peso de una partícula de la fracción  $F$ , que se calcula teniendo en cuenta las suposiciones mencionadas anteriormente.

En congruencia con esta definición, se puede establecer el área superficial  $A_s$  y el área transversal  $A_t$  para cada tamaño. Haciendo uso de las ecuaciones 2 y 3, se determina la sumatoria acumulada de las áreas superficiales  $S$  y transversales  $T$  para diferentes rangos de tamaños  $F$ , las cuales son adimensionalizadas por la sumatoria acumulada de las áreas superficiales asociada a la fracción de mayor diámetro  $M$ . Esta información se grafica respecto al diámetro y se encuentra la intersección de ambas curvas, las cuales tienen un comportamiento inverso (Ver Figura 2-14).

$$T_F = \frac{\sum_{i=1}^F A t_i \times N_i}{S_M} \quad (2)$$

$$S_F = \frac{\sum_{j=F}^M A s_j \times N_j}{S_M} \quad (3)$$



**Figura 2-14.** Ejemplos de curvas para determinar el límite entre matriz y bloques usando la metodología de Nanclares. Tomado de (Nanclares, 2018).

### 2.2.3 Definición de la proporción volumétrica de bloques (VBP)

- **Metodología de Medley**

Al momento de caracterizar un *bim*, una de las propiedades más importantes por su influencia en el comportamiento mecánico es el de la proporción volumétrica de bloques *VBP*. Para determinar este parámetro, es importante conocer el tamaño de partícula límite que separa la matriz de los bloques. El procedimiento para ello se presentó en la sección 2.2.2.

Ahora, conociendo el límite de tamaño entre matriz y bloque, es posible hallar la proporción volumétrica de bloques *VBP* para el área estudiada. Para ello, diversos autores han usado los principios de la estereología, la cual es la ciencia que estudia los sólidos. La palabra proviene de la raíz griega “*stereo*” que significa sólido. La estereología se encarga de explorar cuatro cantidades cardinales; el número, longitud, superficie y volumen de los sólidos (mbf Bioscience, 2019).

Así, autores como Delesse ( (Delesse, 1848) apud (Medley E. , 1994)) mostraron que la proporción areal de ciertos arreglos dentro de la matriz eran iguales a la proporción volumétrica del arreglo. Rosiwal ( (Rosiwal, 1898) apud (Medley E. , 1994)) mostró que la proporción lineal de un arreglo, medida por muchas líneas aleatorias cruzando un plano, eran igual a la proporción areal. Thomson ( (Thomson, 1930) apud (Medley E. , 1994)) demostró que la proporción de puntos que interceptaban un arreglo, fuera de un arreglo mayor de puntos, era también igual a la proporción areal. Luego, de todas estas investigaciones y de los principios de la estereología, se concluye que la densidad de puntos  $P_P$ , proporción lineal de bloques  $L_L$ , proporción areal de bloques  $A_A$  y proporción volumétrica de bloques  $V_V$ , son equivalentes:

$$P_P = L_L = A_A = V_V \quad (4)$$

Estas equivalencias fueron descubiertas y redescubiertas independientemente por trabajadores en muchos campos ( (Underwood, 1970) apud (Medley E. , 1994)).

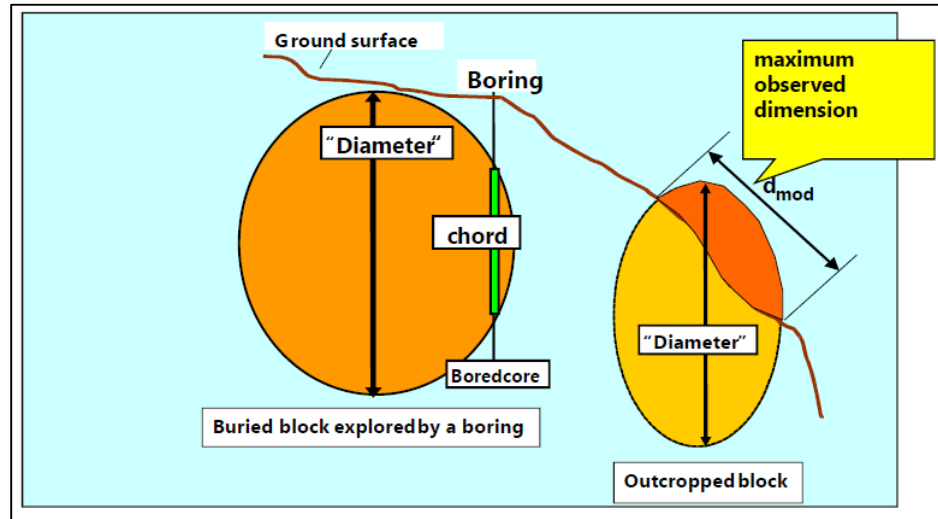
De acuerdo con lo anterior, se puede concluir que la proporción volumétrica de bloques ( $VBP$ ) puede determinarse a partir de perforaciones, mapas geológicos, fotografías aéreas y análisis de imagen del área de interés.

En el caso de las perforaciones, la proporción lineal sería la suma de las longitudes donde las líneas de muestreo interceptan los bloques, dividido por la longitud total perforada. Para los métodos  $2D$ , se tiene que la proporción areal sería la suma de las áreas individuales de cada bloque, dividida por el área de la imagen (Medley E. , 1994).

En el caso de muestras en laboratorio, el volumen de bloques puede determinarse en por desagregación, o puede ser estimado a partir de la densidad del espécimen, si las densidades individuales de los bloques y la matriz son conocidas ( (Lindquist E. S., 1994) apud (Edmund & Dimitrios, 2011)).

Dada la variabilidad y heterogeneidad que presentan los *bims*, al igual que las diferencias que se presentan entre las longitudes medidas a partir de afloramientos y perforaciones, con las longitudes reales (Ver Figura 2-15), surge la pregunta de ¿Cuál debe ser la longitud

o área mínima explorada para determinar la proporción volumétrica de bloques, sin incurrir en errores considerables?



**Figura 2-15.** Diferencia entre la dimensión máxima observable de bloque  $d_{mod}$  en un afloramiento o la cuerda de una perforación, con el diámetro real del bloque. Tomado de (Medley E. , 2002).

Para disminuir los errores y obtener mejores resultados, diversos autores dan ciertas recomendaciones. Por ejemplo, la longitud de las perforaciones o líneas de muestreo debe mantenerse aproximadamente igual ( (Underwood, 1970) de (Medley E. , 1994)). Adicionalmente, las perforaciones no deben estar tan extremadamente cercanas entre sí de tal forma que un bloque sea interceptado por varias líneas; ni tan lejos que las perforaciones solo intercepten el bloque una vez ( (Weibel, 1979) apud (Medley E. , 1994)). Adicionalmente, no es necesario que las perforaciones sean paralelas o se encuentren en el mismo plano (Medley E. , 1994).

Otro aspecto de importancia es determinar la longitud o el área total a explorar, de tal forma que los hallazgos de la exploración sean confiables. Para ello también existen ciertas guías. Por ejemplo, Holmes ( (Holmes, 1921) apud (Medley E. , 1994)) recomienda que la longitud total a perforar sea 100 veces el diámetro promedio de los granos a ser medidos.

Para responder mejor el interrogante de la longitud mínima a explorar tal que no se incurran en errores considerables, (Medley E. , 1997) construyó cuatro modelos físicos de *bims* con

proporciones volumétricas conocidas, variando entre 13% y 55%. El número total de bloques varió ente 2200 (modelo del 13%) y 7300 (modelo del 55%).

34.7	25.9	6.3	0.0	27.0	13.3	22.5	26.8	31.1	41.7
40.0	33.3	44.0	29.6	18.5	39.7	42.5	25.3	19.1	40.3
31.3	24.5	25.3	21.1	27.8	41.3	53.6	23.4	41.4	23.4
34.0	33.8	10.1	22.9	56.6	39.0	34.0	23.2	52.6	27.0
27.2	34.2	21.8	17.0	57.0	51.3	42.4	54.8	51.3	42.0
26.3	28.1	16.3	26.0	48.7	54.3	45.1	46.1	60.9	48.3
44.2	28.0	29.9	34.2	57.0	58.8	37.5	41.2	46.9	29.6
31.3	36.7	41.3	39.5	32.6	30.3	21.9	30.7	33.5	32.7
50.0	41.5	40.7	26.5	28.0	23.8	27.6	13.0	35.9	36.4
58.9	45.5	30.5	11.1	28.1	23.3	17.6	30.3	32.4	47.6

**Figura 2-16.** Arreglo matricial de las 100 proporciones lineares de bloques medidas en el modelo físico de Medley. Tomado de (Medley & Zekkos, 2011) después de (Medley E. , 1997).

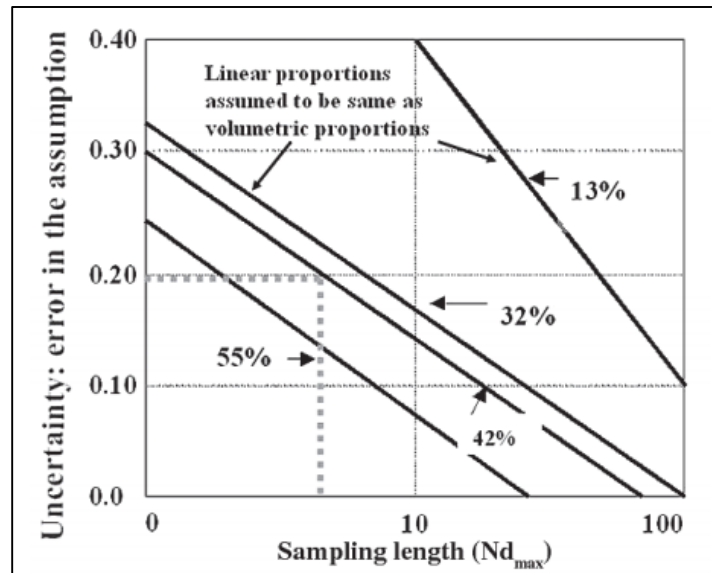
Tras la fabricación de los modelos, cada uno de ellos fue dividido en 10 porciones, y en cada porción se dibujaron 10 líneas de muestreo. De acuerdo con lo anterior, para cada *bim* se realizaron 100 perforaciones o líneas de muestreo, para las cuales se midió la proporción lineal de bloques. Con los resultados se construyó un arreglo matricial en donde se presenta la proporción lineal distribuida en planta. Se observa que para el modelo de 32%, los valores medidos en las líneas de muestreo varían entre 0% y 60,9%, lo que muestra la variabilidad de los *bims* (Ver Figura 2-16) (Medley E. , 1997).

A pesar de la variabilidad observada en la proporción lineal de bloques en valores extremos, si se usaran las 100 líneas de muestreo, la proporción lineal promedio obtenida estaría muy cerca a la proporción volumétrica real. Sin embargo, un proyecto de ingeniería no puede permitirse ejecutar una exploración tan extensiva, por lo que surge la pregunta de cuál es la longitud de perforación mínima requerida para obtener valores confiables.

El trabajo de (Medley E. , 1997), ayuda a responder este interrogante. El experimento mostró que la proporción lineal de bloques debía ser ajustada por un valor de incertidumbre

(actualmente, el coeficiente de variación), que permita una apropiada estimación de la proporción volumétrica de bloques  $VBP$  (Ver Figura 2-17). La incertidumbre depende tanto de la longitud total de las perforaciones, como de la proporción lineal de bloques en sí misma. En la Figura 2-17, la longitud total de las perforaciones es mostrada como múltiplo del tamaño máximo del bloque  $Nd_{max}$  ( (Medley E. , 1997) apud (Medley & Zekkos, 2011)).

En la Figura 2-17 se observa que, a mayor longitud explorada, el error o incertidumbre disminuye. También se evidencia que entre mayor sea la proporción de bloques, el error será menor. Del estudio de (Medley E. , 1997) se concluye que la longitud total de las perforaciones o líneas de muestreo debe ser al menos 10 veces el tamaño del bloque máximo ( $d_{max} = 0,75 L_c$ ); es decir, 7,5 veces la longitud característica  $L_c$ .

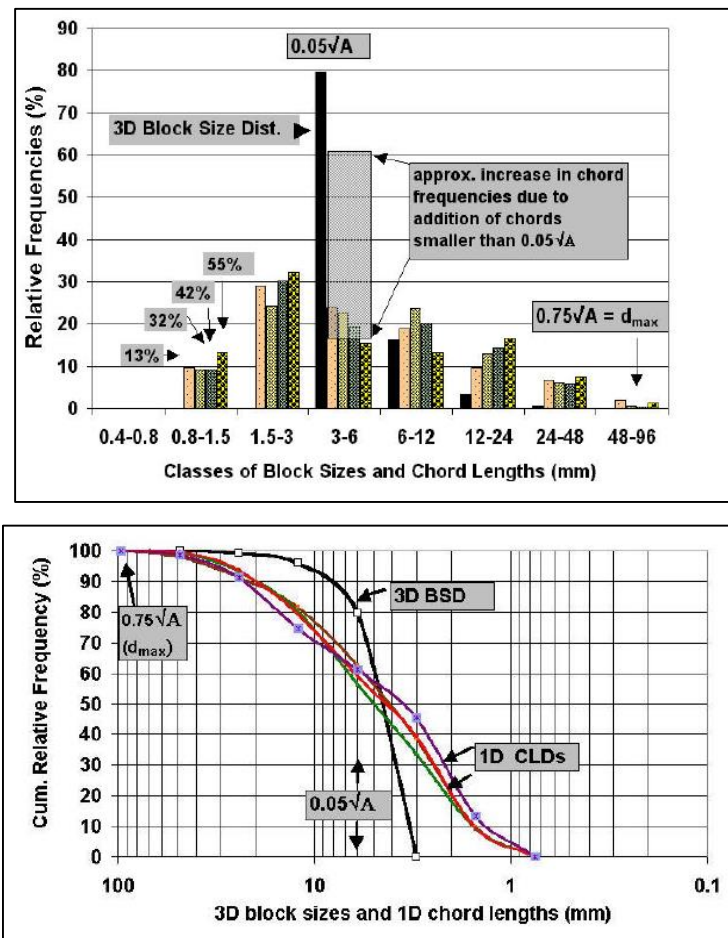


**Figura 2-17.** Ábacos para determinar la incertidumbre en asumir que la proporción lineal de bloques es igual a la proporción volumétrica de bloques. Tomado de (Medley & Zekkos, 2011) después de (Medley E. , 1997).

Del experimento de (Medley E. , Uncertainty in estimates of block volumetric proportions in melange bimrocks, 1997) también se pudo comprobar que, independientemente del número de muestras tomadas, existe poca coincidencia entre la distribución real de tamaños de bloques  $3D$  y la distribución de cuerdas  $1D$  medidas en perforaciones. El efecto de cola es bien demostrado: se generaron longitudes de cuerda que eran más pequeñas

que el tamaño de los bloques reales más pequeños, por debajo de  $0,05L_c$  (Medley E. , 2002).

De la Figura 2-18 se observa que, aunque el mayor número de bloques reales es para el tamaño más pequeño (frecuencia relativa del 80%), hay muchas cuerdas en este tamaño. Lo anterior es esperado dada la pequeña probabilidad geométrica de encontrar un bloque pequeño en una perforación, inclusive si hay muchas de ellos (Medley E. , 2002).



**Figura 2-18.** Histograma de distribución de tamaños de bloques 3D (barras negras) para los cuatro modelos físicos de Medley, y distribución de longitud de cuerdas obtenidas de las líneas de muestreo (Arriba). Distribución real 3D de tamaño de bloques y distribución 1D de longitudes de cuerda para los cuatro modelos físicos de Medley (Abajo). Tomado de (Medley E. , 2002).

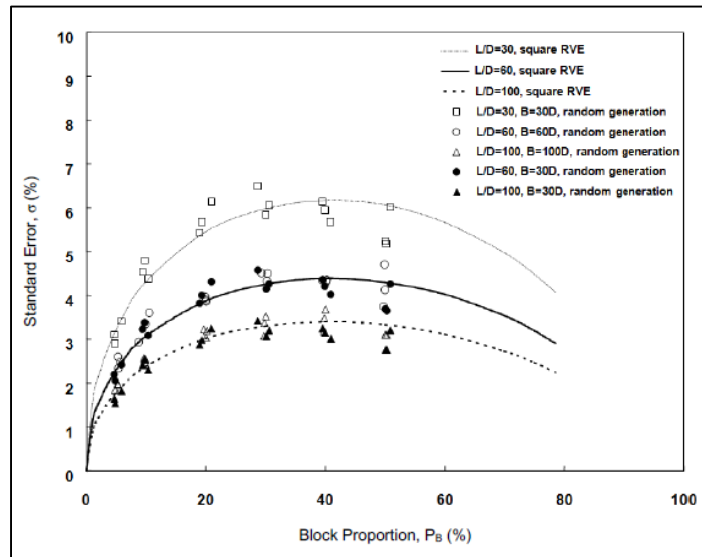
Por otro lado, los bloques mayores, dado su tamaño, son más probables de encontrar; sin embargo, generalmente no se atraviesan por la dimensión más larga. Es por ello que la



frecuencia relativa de las cuerdas más grandes es mayor que la frecuencia relativa de bloques en el mismo rango de tamaños; debido a que unas pocas cuerdas grandes en relación al número total de cuerdas pequeñas, inflan la frecuencia (Medley E. , 2002).

#### ▪ Metodología de Tien et al

Otros autores han usado un enfoque numérico y analítico para hallar el error al determinar la proporción volumétrica de bloques a través de líneas de muestreo  $1D$  o análisis de imagen  $2D$ .



**Figura 2-19.** Error estándar obtenido a partir de las simulaciones numéricas. Tomado de (Tien, y otros, 2010).

Para el caso de las líneas de muestreo, (Tien, y otros, 2010) usaron el concepto del *Elemento de Volumen Representativo RVE* y consideraron un caso simple en donde los bloques eran circulares y de un tamaño fijo, distribuyéndose uniformemente en la matriz. Los autores modelaron numéricamente diferentes arreglos aleatorios. De la investigación encontraron que cada línea puede verse como un proceso de suma, por lo que las estadísticas de su proporción volumétrica de bloques  $VBP$ , convergerán a la distribución *Gaussiana*, la cual puede explicarse mediante el teorema del límite central. Así, aplicando principios estadísticos lograron determinar analíticamente la desviación estándar  $\sigma$  y el coeficiente de variación normalizado  $COV$ , en función de la proporción volumétrica de

bloques promedio  $E[VBP]$ , la relación entre la longitud de las líneas de muestreo  $L$  y el diámetro promedio de los bloques  $D$ . Los resultados obtenidos para diferentes proporciones de bloques y relaciones  $\frac{L}{D}$ , se presentan en la Figura 2-19.

$$\sigma_{1D}[VBP] = \frac{1}{\sqrt{\frac{L}{D}}} \sqrt{\frac{8}{3\pi} E[VBP] - \frac{\sqrt{\pi E[VBP]^3}}{2}} \quad (5)$$

$$COV_{1D}[VBP] = \frac{1}{\sqrt{\frac{L}{D}}} \sqrt{\frac{8}{3\pi E[VBP]} - \sqrt{\frac{\pi}{4E[VBP]}}} \quad (6)$$

(Tien, Chung, Lu, & Chang, 2012), citado en (Tien, y otros, 2012), para verificar validez de las ecuaciones anteriores, corrió simulaciones numéricas con diferentes configuraciones encontrando a partir de regresiones, la ecuación 7, donde  $V_f$  es la fracción volumétrica de bloques.

$$COV_{1D}[VBP] = \frac{1}{\sqrt{\frac{L}{D}}} \left( -0,925(\log V_f)^3 + 4,79(\log V_f)^2 - 10,1(\log V_f) + 8,69 \right) \quad (7)$$

(Tien, Lu, Wu, & Chung, 2010) y (Tien, Lu, Wu, & Chung, 2011), apud (Tien, y otros, 2012), adecuaron la ecuación 7 para considerar el efecto de la anisotropía del bimrock en la determinación del error de la proporción volumétrica de bloques; obteniendo la ecuación 9; donde  $k$  y  $\theta$  son factores que consideran el aspecto y la orientación de los bloques.

$$COV_{1D}[VBP] = \frac{1}{K \sqrt{\frac{L}{D}}} \sqrt{\frac{8}{3\pi V_f} - \sqrt{\frac{\pi}{4V_f}}} \quad (8)$$

$$K = \sqrt[4]{k \cos^2 \theta + \frac{1}{k} \sin^2 \theta} \quad (9)$$

Un ejercicio similar fue realizado por (Tien, y otros, 2012), pero efectuando una modelación 3D y usando superficies para determinar la proporción de bloques; las cuales simularían medidas 2-D con análisis de imagen. Los análisis incluyeron la inclusión de  $k$  diferentes tamaños de partículas; donde cada tamaño tenía un número diferente de partículas presentes. Se puede asumir un radio promedio  $\bar{R}$  en función del volumen  $C_i$  y radio  $R_i$  de cada fracción. La desviación estándar  $\sigma_{2D}$  y el coeficiente de varianza  $COV_{2D}$  (Ver ecuaciones 10 y 11) también fueron obtenidas analíticamente (Tien, y otros, 2012).

$$\bar{R} = \sqrt{\sum_{i=1}^k C_i R_i^2}$$

$$\sigma_{2D} = \frac{1}{\sqrt{\frac{A}{\pi \bar{R}^2}}} \sqrt{\frac{4V_f}{5} - \sqrt[3]{\frac{16V_f^4}{9\pi}}} \quad (10)$$

$$COV_{2D} = \frac{1}{\sqrt{\frac{A}{\pi \bar{R}^2}}} \sqrt{\frac{4}{5V_f} - \sqrt[3]{\frac{16}{9\pi V_f}}} \quad (11)$$

Finalmente, (Tien, y otros, 2012), utilizando simulaciones en computadora considerando partículas mono y polidispersas, pudieron obtener una ecuación empírica a partir de la regresión de los errores medidos en la simulación numérica. La ecuación se presenta a continuación, en la ecuación 12.

$$COV_{2D} = \frac{1}{\sqrt{\frac{A}{\pi \bar{R}^2}}} \left( 1,57(\log V_f)^2 - 0,56(\log V_f) + 0,0742 \right) \quad (12)$$

## 2.2.4 Resistencia al corte de los bimrocks/bimsoils

La resistencia al corte es uno de los parámetros más importantes de cualquier geomaterial. En el caso de los *bims*, juega un papel aún más importante, debido a las dificultades que hay en determinar valores de resistencia al corte. Como se mencionó anteriormente, el

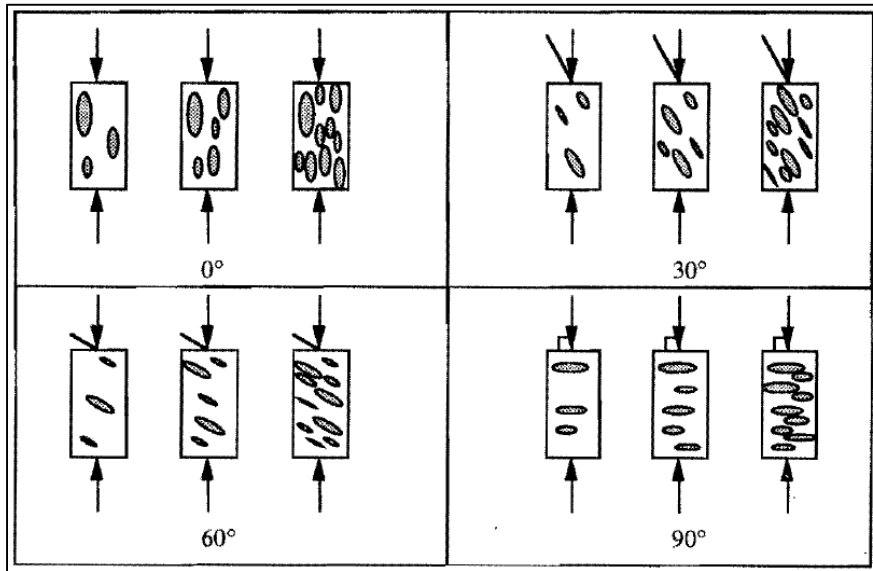
contraste en la resistencia entre matriz y bloques hace que la toma de muestras, la realización de ensayos in-situ y/o en laboratorio, sea una tarea compleja, que en ocasiones no puede llevarse a cabo o implica enormes costos y dificultades logísticas.

Para superar esas dificultades, algunos autores han tratado de determinar cuáles son las propiedades físicas que influyen en la resistencia al corte de estos materiales; y han procurado cuantificar su efecto. Se han estudiado, con este propósito, el efecto de aspectos como la orientación de bloques, la gradación, la granulometría, la proporción volumétrica de bloques, entre otros.

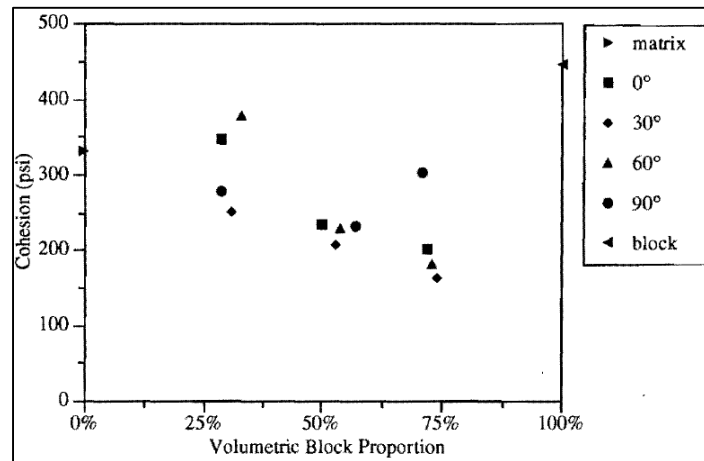
- **Orientación de los bloques**

El efecto de la orientación de bloques en *bims* fabricados artificialmente a partir de bloques embebidos en una matriz hecha de suelo-cemento fue estudiada por (Lindquist & Goodman, 1994) Con este fin se construyeron muestras con bloques orientados 0°, 30°, 60° y 90° respecto a la dirección de la carga axial aplicada. Los especímenes se construyeron variando también la proporción volumétrica de bloques (Ver Figura 2-20).

Las muestras se ensayaron triaxialmente para determinar parámetros de resistencia aplicando el criterio de falla de Mohr-Coulomb. En total se ensayaron del orden de 100 muestras de 6" de diámetro y 80 de 2" de diámetro. Los resultados de los ensayos se resumen en la Figura 2-21 y Figura 2-22.

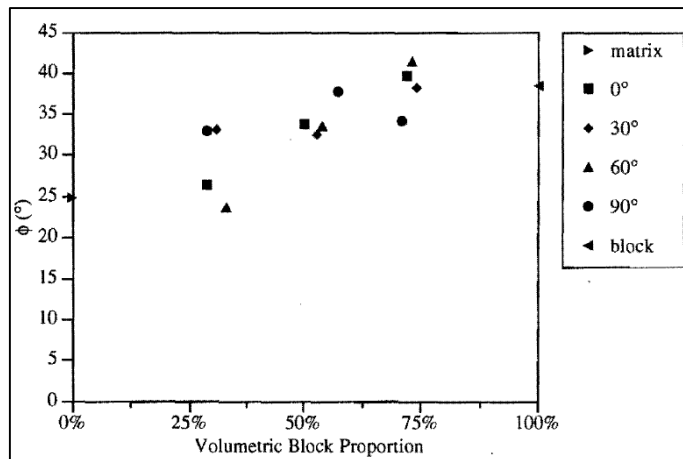


**Figura 2-20.** Tipos de muestras ensayadas por (Lindquist & Goodman, 1994)  
Tomado de (Lindquist & Goodman, 1994).



**Figura 2-21.** Cohesión vs Proporción de bloques para diferentes orientaciones de bloques.  
Tomado de (Lindquist & Goodman, 1994).

De los resultados se observa que los especímenes con bloques orientados 30° respecto a la dirección de la carga axial tienen la menor cohesión  $c$  comparados con los modelos con una proporción de bloques similar y diferentes orientaciones.



**Figura 2-22.** Ángulo de fricción vs Proporción de bloques para diferentes orientaciones de bloques.

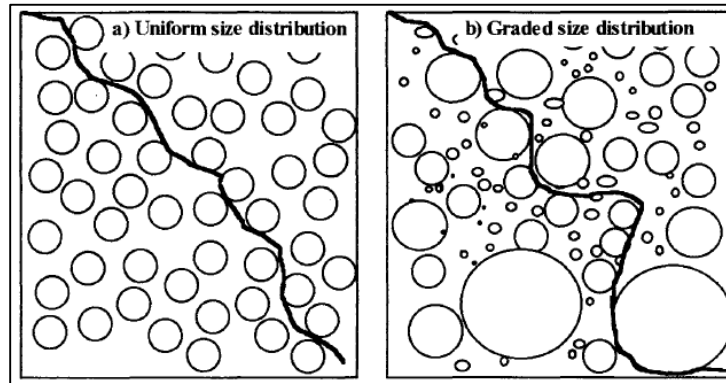
Tomado de (Lindquist & Goodman, 1994).

Adicionalmente, para especímenes con una proporción volumétrica de bloques  $VBP$  media y alta, el ángulo de fricción interna  $\phi$  del suelo no varía significativamente con la orientación de los bloques. Lo anterior corrobora la afirmación hecha por Goodman (Goodman R. , 1989) que dice que “la variación del ángulo de fricción con la dirección de los bloques prueba ser menos severa que la variación de la cohesión (intercepto de la resistencia) en rocas anisotrópicas”.

En la Figura 2-21 y Figura 2-22 también se evidencia que la cohesión  $c$  y el ángulo de fricción  $\phi$  de los especímenes de  $0^\circ$  y  $60^\circ$  son muy similares a los valores de la matriz; mientras que los especímenes de  $30^\circ$  y  $90^\circ$  tienen valores de cohesión mucho menores y mayores ángulos de fricción.

#### ▪ Gradación

Lindquist (Lindquist E. S., 1994), apud (Medley E. , 1994)) demostró que la superficie de falla en los *bims* se presenta a través de la matriz y esquivando los bloques; lo que genera una tortuosidad en la geometría de la superficie de la falla, la misma que influye en el incremento en la resistencia del material y del ángulo de fricción.

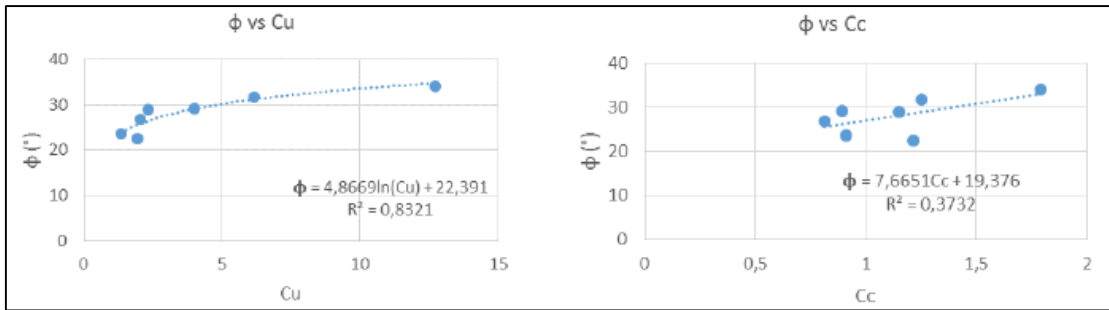


**Figura 2-23.** Influencia de la distribución de tamaño de bloques en la rugosidad de la superficie de falla para dos distribuciones diferentes con la misma proporción volumétrica de bloques.

Tomado de (Medley E. , 1994)

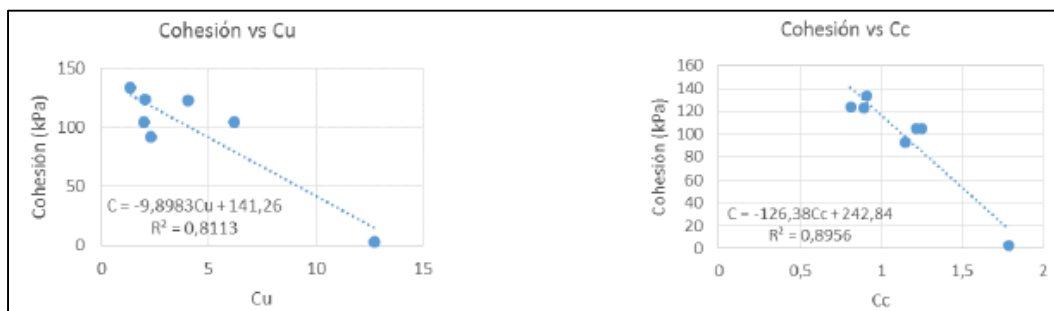
Los especímenes de prueba usados por Lindquist para demostrar lo anterior tenían aproximadamente la misma distribución de tamaños de bloques, pero diferentes proporciones volumétricas y orientaciones. Sin embargo, la proporción volumétrica de bloques en un *bim* probablemente depende parcialmente tanto de la forma y distribución de tamaño de los bloques. Lo anterior se muestra en la Figura 2-23, donde se evidencia la influencia de la gradación, en la rugosidad aparente de la superficie de falla, para dos muestras con la misma proporción volumétrica de bloques. Se evidencia que las distribuciones bien gradadas (mayor variedad de tamaños) obligan a un patrón más rugoso de la superficie de falla.

Nanclares (Nanclares, 2018) también estudio la influencia de la gradación en muestras remoldeadas de origen aluvial. En sus resultados encontró que a valores mayores del coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ) y coeficiente de curvatura ( $C_c$ ), se presentaban incrementos en el ángulo de fricción de los materiales (Ver Figura 2-24).



**Figura 2-24.** Influencia del coeficiente de uniformidad y el coeficiente de curvatura en el ángulo de fricción de muestras remoldeadas de origen aluvial. Tomado de (Nanclares, 2018).

El mismo autor encontró un resultado contrario con el valor de la cohesión, en donde a valores mayores de  $C_u$  y  $C_c$ , se obtuvieron menores valores de cohesión. Los resultados se presentan en la Figura 2-25.



**Figura 2-25.** Influencia del coeficiente de uniformidad y el coeficiente de curvatura en la cohesión de muestras remoldeadas de origen aluvial. Tomado de (Nanclares, 2018).

Es importante anotar que, de acuerdo con el sistema unificado de clasificación de suelos (USCS, por sus siglas en inglés), los materiales bien gradados son aquellos con  $1 < C_c < 3$ , y  $C_u \geq 4$  o  $C_u \geq 6$ ; según el material sea grava o arena, respectivamente.

#### ▪ Proporción volumétrica de bloques

La proporción volumétrica de bloques es uno de los parámetros que tiene mayor influencia en la resistencia al corte de los *bimrocks/bimsoils*; por lo que múltiples autores han estudiado sus efectos.



Por ejemplo, (Lindquist & Goodman, 1994) llevaron a cabo una serie de ensayos sobre modelos fabricados en laboratorio. Los autores evaluaron el efecto en la resistencia de propiedades como la orientación y la proporción volumétrica de los bloques *VBP*. En capítulos anteriores se habló de los resultados de estas pruebas, evidenciando el efecto de la orientación de los bloques en la resistencia de los bimrocks (Ver Figura 2-21 y Figura 2-22). Sin embargo, de la investigación realizada, también se encontró que la proporción volumétrica de bloques es uno de los parámetros que más influye en la resistencia. Se estableció que, con incrementos en la cantidad de bloques, generalmente se produce una reducción en la cohesión. En efecto, los especímenes con una alta proporción de bloques (alrededor del 70%), tienen una cohesión de solo la mitad en comparación con la cohesión de la matriz (Ver Figura 2-21).

También se evidenció que hay incrementos en el ángulo de fricción del material, en la medida que aumenta la proporción volumétrica de bloques, según se muestra en la Figura 2-22. El máximo incremento medido se presentó para los especímenes con una proporción volumétrica de bloques de 75% y con bloques orientados  $60^\circ$  respecto a la dirección de aplicación de la carga. El aumento fue de  $16,5^\circ$  en comparación con los valores medidos en la matriz, es decir, una mejora del 66%.

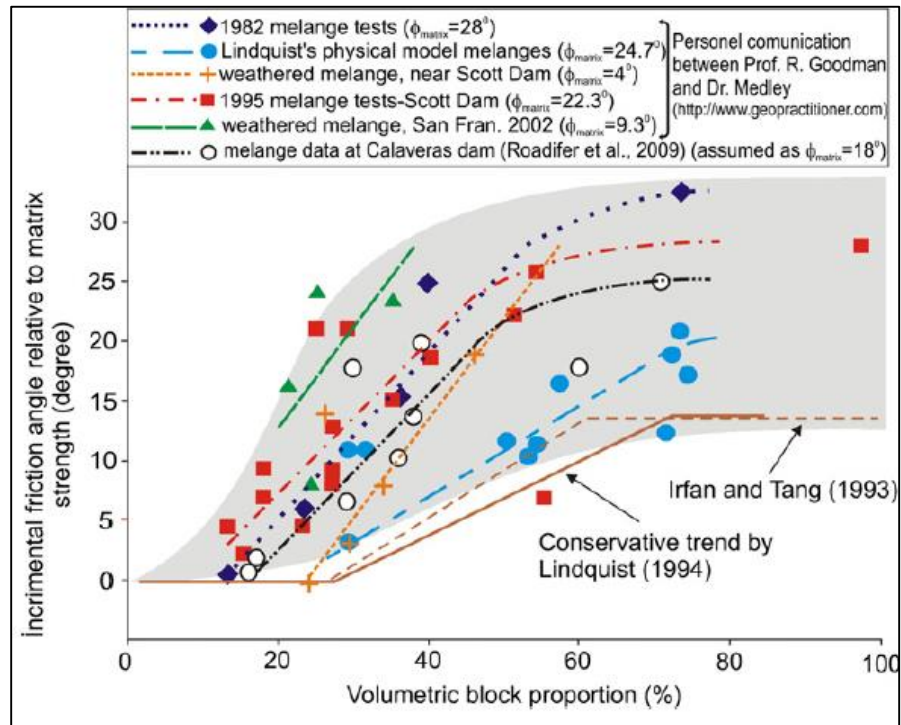
Otra conclusión de la investigación de (Lindquist & Goodman, 1994) fue que para proporciones de bloque por debajo de 30%, el efecto de estos en la resistencia es mínimo. Lo anterior respalda los hallazgos de otros autores ( (Irfan & Tang, 1993), apud (Lindquist & Goodman, 1994)) que han sugerido usar el 25% como el valor límite en el cual no hay efecto en la resistencia de la proporción volumétrica de bloques.

La explicación física del fenómeno se puede hallar al revisar especímenes fallados y observar la superficie de falla, la cual se tiende a presentar a lo largo de la matriz y esquivando los bloques, lo que le confiere un carácter tortuoso. En la medida que la cantidad de bloques es mayor, aumenta también la tortuosidad de la superficie y, por ende, también lo hace el ángulo de fricción  $\varphi$  del material. Caso contrario ocurre con la cohesión  $c$ , donde una mayor proporción de bloques significa una mayor densidad de las superficies de debilidad, resultando en una cohesión menor (Lindquist & Goodman, 1994).

Por otro lado, más allá de una proporción volumétrica de bloques de 75%, se ha observado que no hay mayor incremento en la resistencia del *bim*. Lo anterior es debido a que los bloques tienden a estar en contacto entre ellos, y la condición se aproxima a la de un macizo fracturado con relleno en las juntas o discontinuidades ( (Lindquist E. S., 1994), apud (Medley & Zekkos, 2011)).

A pesar de que el límite de bloques en volumen que separa el comportamiento de un *bim* del de un macizo fracturado se estimó en 75%, se ha observado que por encima del 60% la cantidad de bloques es tal que se presentan contactos entre ellos. En este caso, la resistencia del *bim* se ve afectada por la redondez del bloque, el grado de trabazón entre bloques y el esfuerzo normal de confinamiento al que está sometido el bimrock (Kalender, Sonmez, Medley, Tunusluoglu, & Kasapoglu, 2014)

El trabajo realizado por (Lindquist E. S., 1994) en el cual relaciona el ángulo de fricción de los bimrocks con la proporción volumétrica de bloques, ha sido complementado o ha corroborado hallazgos realizados por otros autores a lo largo de estos años. Por ejemplo, (Irfan & Tang, 1993) estudiaron los efectos de la fracción granular en la resistencia al corte de depósitos de vertiente en Hong Kong. Su investigación incluyó análisis regresivos de taludes en orden de cuantificar el efecto de los bloques en la resistencia al corte del depósito. Dentro del estudio, se realizó una caracterización geotécnica de propiedades como el tamaño, la superficie, el grado de meteorización de los bloques, al igual que la densidad o consistencia (i.e. la resistencia) y el tamaño de grano de la matriz. También se evaluó la proporción en volumen de bloques y el grado de meteorización de todo el depósito. De los resultados de los análisis regresivos, se encontró que el incremento promedio en la resistencia al corte del depósito de vertiente era de alrededor de 2,0 *kPa* a 2,5 *kPa* por cada incremento del 10% en la cantidad de bloques.



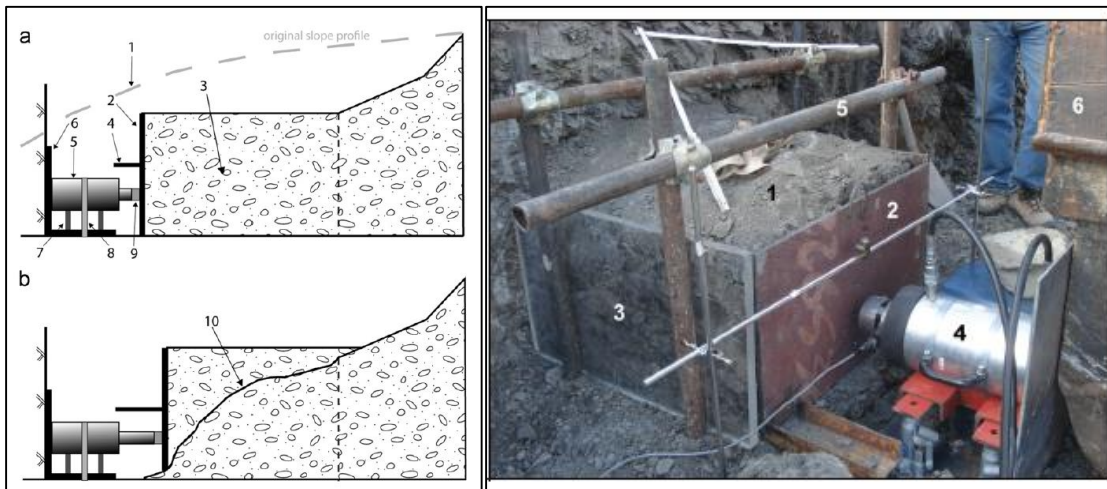
**Figura 2-26.** Efecto de la VBP en el ángulo de fricción interna de los bimrocks. Tomado de (Kalender, Sonmez, Medley, Tunusluoglu, & Kasapoglu, 2014).

La investigación realizada por (Irfan & Tang, 1993) también incluyó la realización de ensayos de laboratorio para estudiar el efecto de la fracción gruesa en la resistencia de depósitos coluviales y materiales similares. Para ello fabricaron muestras reconstituidas de suelo conteniendo bloques en una matriz finogranular, compactándolas a una densidad que replicara la del depósito. Los ensayos se realizaron en equipos de compresión triaxial y corte directo de grandes dimensiones. Los resultados obtenidos muestran un incremento despreciable en la resistencia al corte para muestras de suelo con una proporción de bloques en volumen por debajo del 10%. Especímenes con volumen de bloques entre 10% y 30% presentan un pequeño aumento en la resistencia. Más allá de 30% se observa un incremento más agudo en la resistencia al corte. Lo anterior es congruente con los resultados obtenidos por otros investigadores.

Una compilación de resultados de diversos estudios e investigaciones es presentado por (Kalender, Sonmez, Medley, Tunusluoglu, & Kasapoglu, 2014) en una gráfica (Ver Figura 2-26. En ella se evidencia el aumento en el ángulo de fricción interna de los *bims*, con el

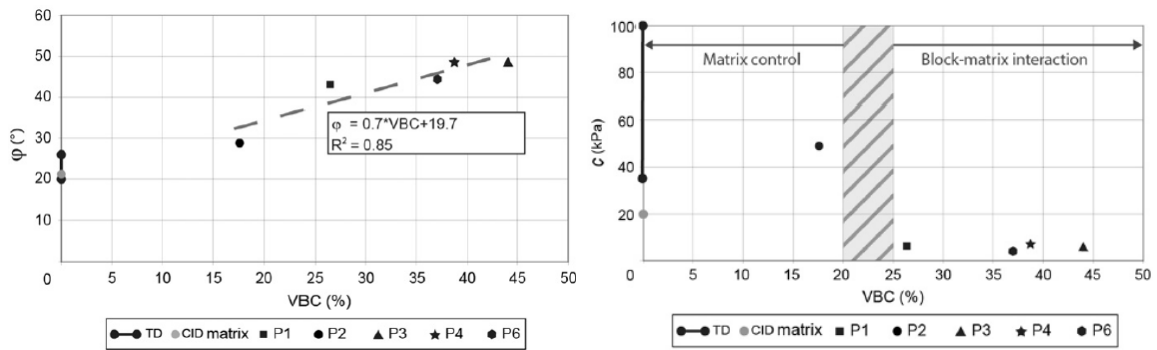
incremento en la proporción volumétrica de bloques. Se observa que se pueden obtener diferencias de hasta  $30^\circ$ , en comparación de los valores de resistencia de la matriz.

Adicional a las investigaciones presentadas en la Figura 2-26, otros autores han tratado de determinar la influencia de la proporción de bloques en la resistencia. Para ello, han recurrido a pruebas in-situ y/o pruebas con equipos de gran escala, sobre materiales inalterados o sobre mezclas suelo-roca compactadas.



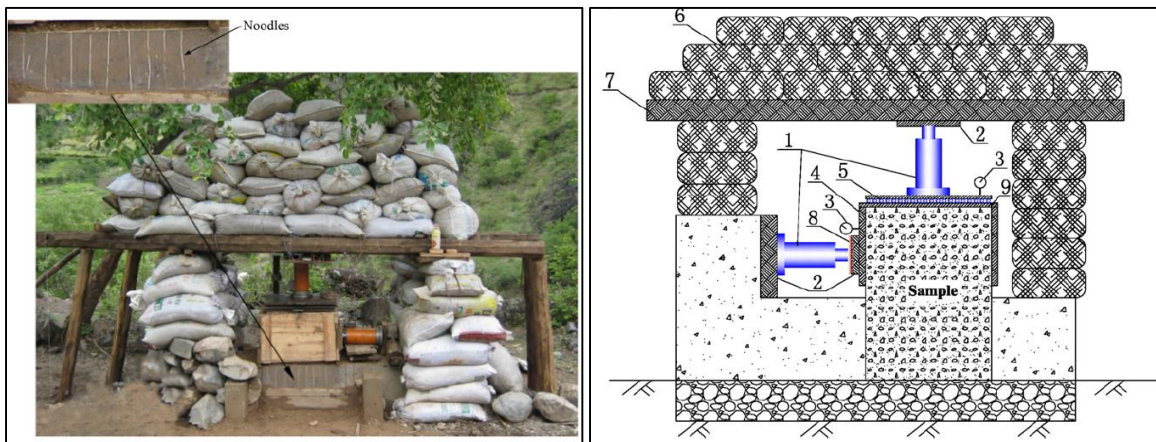
**Figura 2-27.** Esquema (Izquierda) y fotografía (Derecha) del “*bimtest*”. Tomado de (Coli, Berry, & Boldini, 2010) y (Coli, Berry, Boldini, & Bruno, 2009). La numeración de los elementos de ensayo se explica en artículo de origen.

Para el primer caso, (Coli, Berry, & Boldini, 2010) idearon un ensayo no convencional de gran dimensión, denominado “*bimtest*”, el cual consiste en la aplicación de una carga al terreno natural mediante una placa, generando una superficie de falla libre, la cual permite la tortuosidad característica de los *bims* (Ver Figura 2-27). Los resultados obtenidos son congruentes con lo presentado hasta el momento, en donde se observa un incremento en el ángulo de fricción y una reducción de la cohesión de los *bims* con la cantidad de bloques (Ver Figura 2-28).

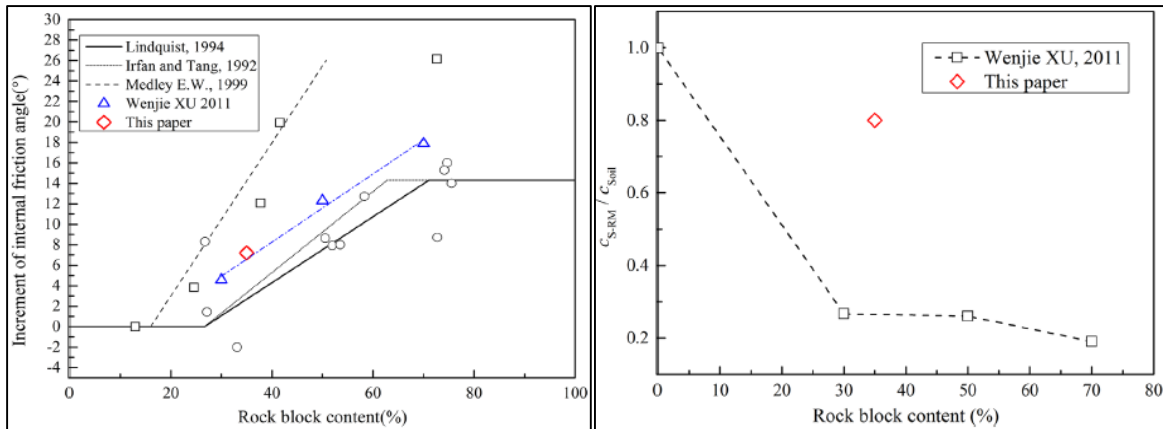


**Figura 2-28.** Correlación entre el ángulo de fricción (Izquierda) y la cohesión (Derecha) con la proporción de bloques. Tomado de (Coli, Berry, & Boldini, 2010).

Por otro lado, (Xu, Xu, & Hu, 2011) llevaron a cabo un ensayo de corte directo de grandes dimensiones sobre un material remodelado (Ver Figura 2-29), el cual fue reconstruido buscando replicar la proporción de bloques y características del material original. En el ensayo se varió el contenido de bloques, encontrando resultados similares a los ya expuestos, en donde había un incremento de la fricción y una reducción de la cohesión con el aumento del contenido de bloques (Ver Figura 2-30).



**Figura 2-29.** Equipo y esquema del ensayo de corte directo de gran dimensión. Tomado de (Xu, Xu, & Hu, 2011).



**Figura 2-30.** Efecto de la proporción de bloques en la cohesión y el ángulo de fricción de mezclas remoldeadas de suelo y roca.

Tomado de (Zhang, Xu, Xia, & Zhang, 2015) después de (Xu, Xu, & Hu, 2011).

Usando un montaje similar al presentado en la Figura 2-29, (Zhang, Xu, Xia, & Zhang, 2015) realizaron un ensayo sobre material compactado del terraplén de la presa de Nouzhadu-China. Los resultados complementaron la investigación realizada por (Xu, Xu, & Hu, 2011), evidenciando una tendencia lineal del incremento de la fricción con el contenido de bloques (Figura 2-30).

Las investigaciones realizadas sobre *bims* no solo se enfocaron en determinar el efecto del contenido de bloques en la fricción o la cohesión del material; sino también en la resistencia a la compresión simple *UCS* de estos materiales. Por ejemplo, (Sonmez, Gokceoglu, Medley, Tuncay, & Nefeslioglu, 2006) investigaron el efecto de la proporción equivalente de bloques *EBP* y el contraste de resistencia entre los bloques y la matriz, en la resistencia del Aglomerado Volcánico de Ankara.

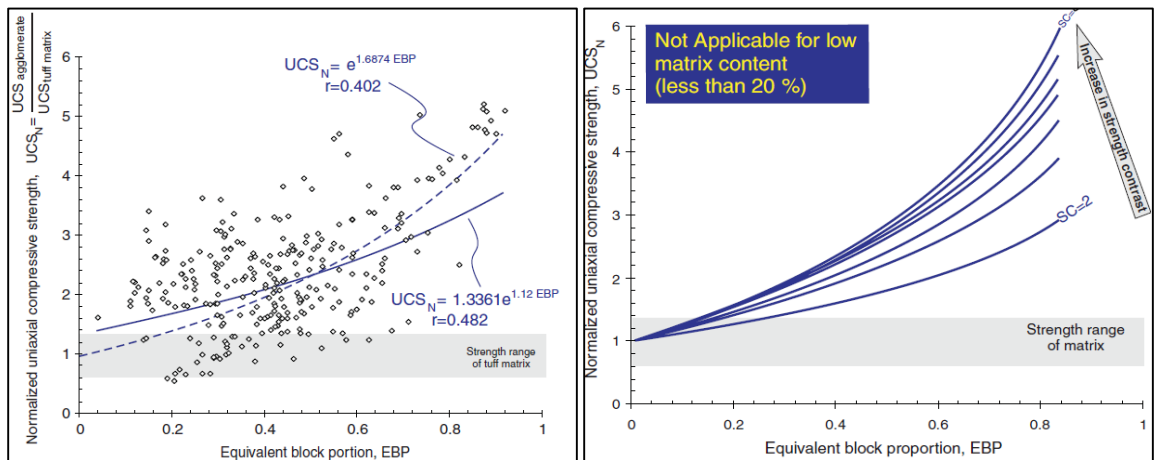
Debido a que el Aglomerado Volcánico de Ankara está compuesto por una mezcla de bloques de andesita rosada y negra variando entre unos pocos centímetros y un metro de diámetro aproximadamente; embebidos en una matriz cementada de tobas blandas. Dado que existe una diferencia en la resistencia entre los bloques de andesita rosa y negra, siendo estos últimos más resistentes, se utilizó una proporción equivalente de bloques *EBP*, el cual tiene en cuenta el efecto de este contraste. El valor de *EBP* está dado por la expresión que se muestra enseguida; en donde  $VBP_i$  y  $UCS_i$  es la proporción volumétrica



de bloques y la resistencia a la compresión simple del elemento  $N^{\circ}i$ , mientras que  $UCS_{max\_block}$  es la resistencia a la compresión simple del bloque más fuerte.

$$EBP = \sum_i^n VBP_i \frac{UCS_i}{UCS_{max\_block}} \quad (13)$$

Los resultados de los ensayos arrojaron un incremento en la resistencia a la compresión simple de los *bims* con el aumento en la proporción equivalente de bloques  $EBP$ . El efecto de los bloques en la resistencia se acentuó para contenidos de bloques altos (Ver Figura 2-31). También se evidenció que, a mayor contraste de resistencia entre matriz y bloques, el valor de  $UCS$  era mayor, para un mismo valor de  $EBP$ . Lo anterior se presenta debido a que la matriz del *bim* está litificada. En materiales donde la matriz no está soldada, siempre y cuando haya un contraste tal que la superficie de falla se presente esquivando los bloques, la resistencia de los últimos no tendrá efecto en la resistencia de todo el conjunto (Sonmez, Altinsoy, Gokceoglu, & Medley, 2006).

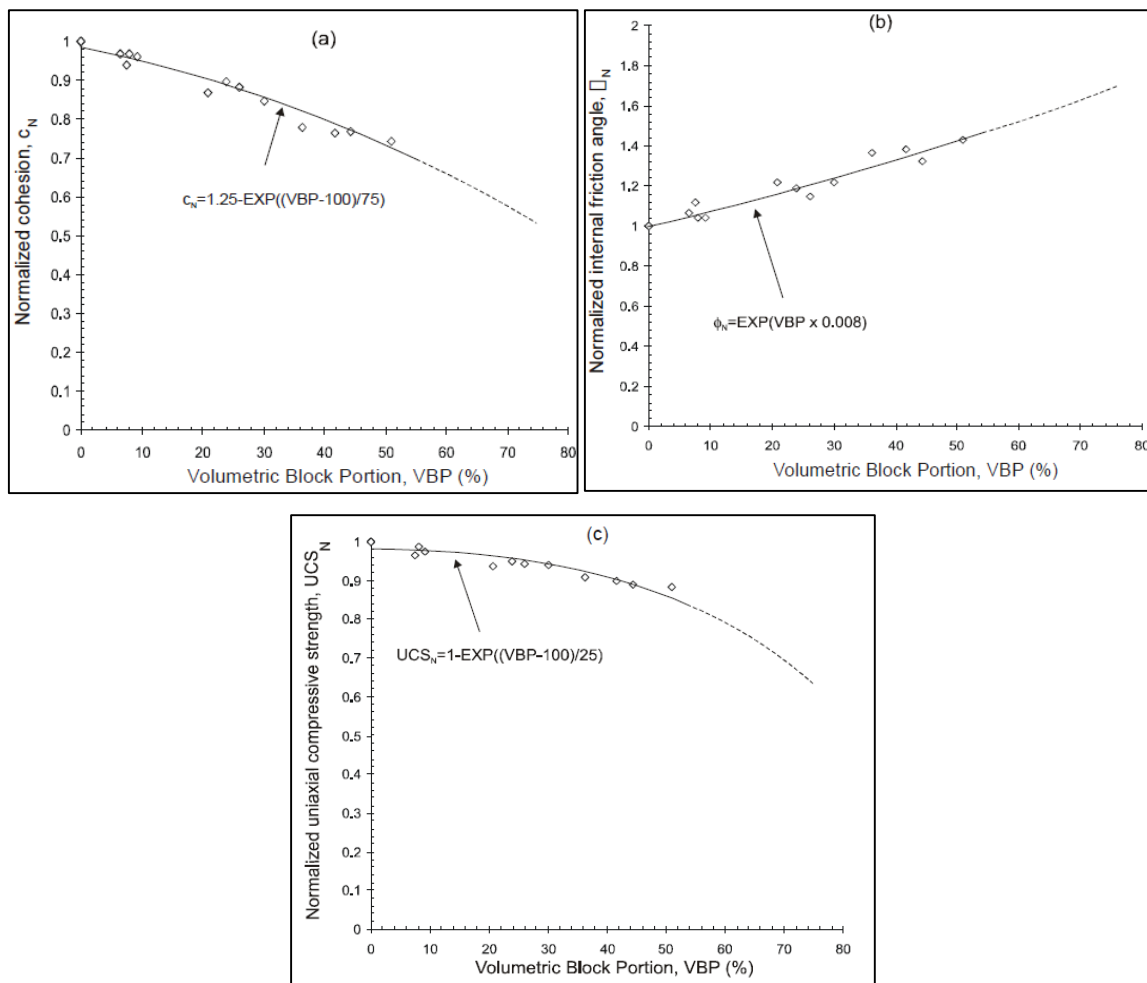


**Figura 2-31.** Efecto de la proporción equivalente de bloques  $EBP$  (Izquierda) y el contraste entre los bloques y la matriz (Derecha), en la resistencia a la compresión simple de los bimrocks de matriz soldada.

Tomado de (Sonmez, Gokceoglu, Medley, Tuncay, & Nefeslioglu, 2006).

Con el propósito de desarrollar un criterio de resistencia empírico para los *bims*, (Sonmez, Altinsoy, Gokceoglu, & Medley, 2006) realizaron ensayos de compresión simple y compresión triaxial para muestras artificiales preparadas con bloques de tobas y andesitas, mezcladas en una matriz de cemento, bentonina y yeso blanco. En las muestras se varió

la proporción de bloques, encontrándose parámetros como la cohesión  $c$ , el ángulo de fricción  $\phi$  y la resistencia a la compresión simple  $UCS$ . Todos ellos fueron normalizados respecto a los valores encontrados para la matriz. Los resultados reiteran los hallazgos de otras investigaciones, en donde a mayor proporción de bloques, se presenta un incremento en el ángulo de fricción  $\phi$  y una disminución de la cohesión  $c$ . En cuanto a los valores de la  $UCS$ , se encontró un comportamiento inverso al exhibido por *bims* con matriz soldada (Ver Figura 2-31); en donde a mayor cantidad de bloques se da una reducción en el valor de la  $UCS$ . Los resultados se presentan en la Figura 2-32.

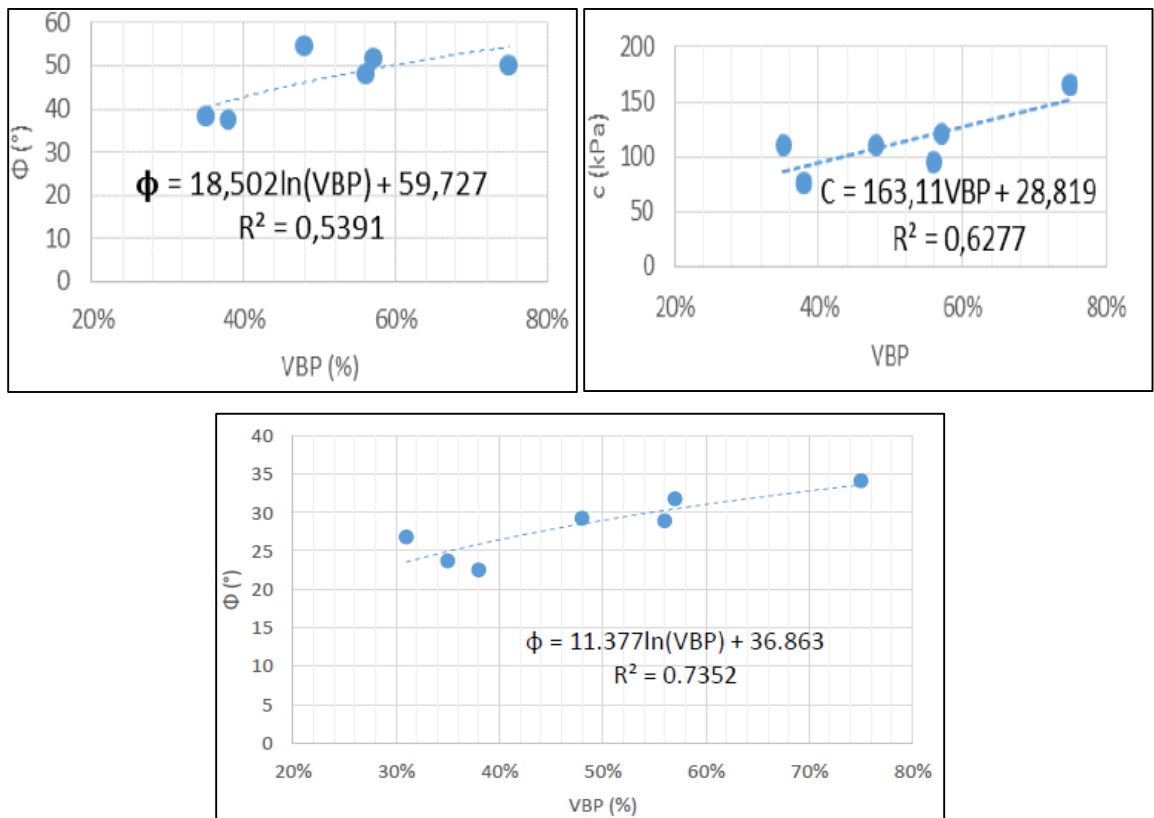


**Figura 2-32.** Relación entre la resistencia normalizada y la proporción volumétrica de bloques  $VBP$ .

Tomado de (Sonmez, Altinsoy, Gokceoglu, & Medley, 2006).



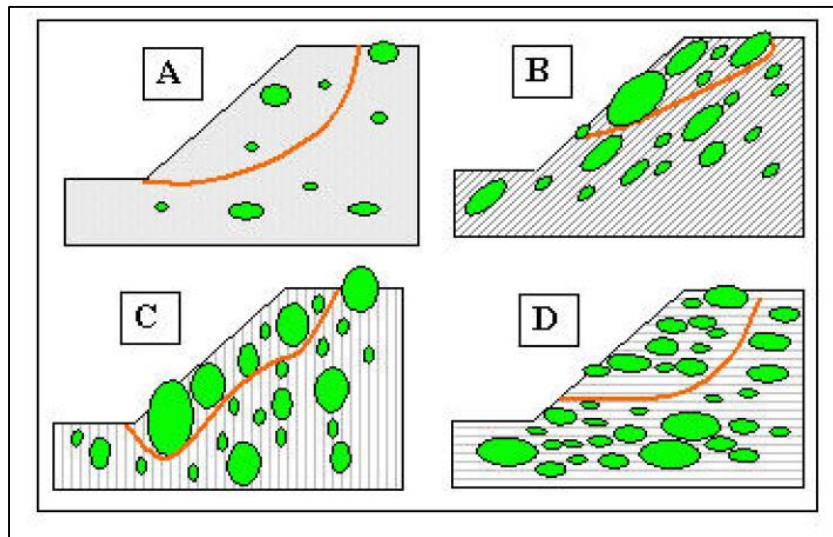
Finalmente, (Nanclares, 2018) investigó la resistencia al corte de muestras remoldeadas de origen aluvial. Para ello fabricó muestras de grandes dimensiones buscando variar el contenido de bloques, replicando las condiciones de densidad encontradas en campo. Los especímenes fueron fallados mediante ensayos de corte directo y compresión triaxial de grandes dimensiones. Para determinar la proporción de bloques, (Nanclares, 2018) usó la metodología que propuso, la cual se explica y se formula matemáticamente en este documento (Ver numeral 2.2.2). Los resultados evidenciaron también un aumento del ángulo de fricción  $\phi$  y la cohesión  $c$  del material, con el incremento en los bloques (Ver Figura 2-33).



**Figura 2-33.** Relación entre los parámetros de resistencia y la proporción de bloques de muestras remoldeadas de origen aluvial. Resultados obtenidos a partir de ensayos de Corte Directo (Arriba) y Compresión Triaxial (Abajo). Tomado de (Nanclares, 2018).

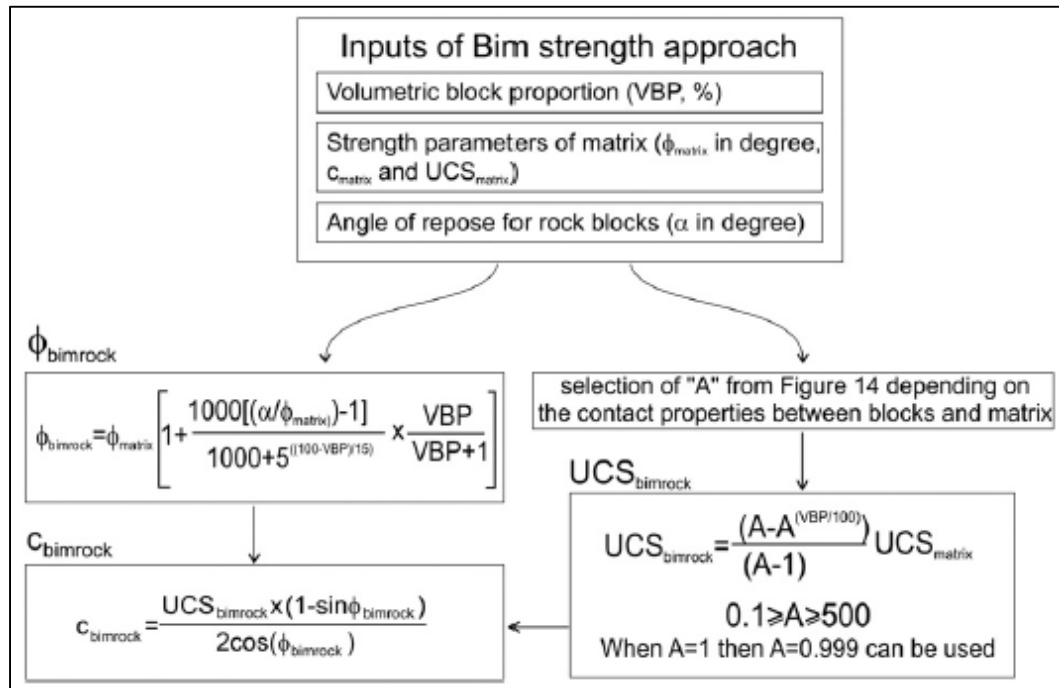
- **Forma de los bloques**

La forma de los bloques es uno de los parámetros de los que menos información se encuentra en la literatura técnica. Por ejemplo, (Medley & Rehmann, 2004) concluyeron que la forma de los bloques influencia la tortuosidad de la superficie de falla, especialmente cuando se considera también su orientación. Bloques elípticos cuyo eje mayor está orientado con la dirección del corte tienen el efecto más perjudicial para la estabilidad de los taludes (Ver Figura 2-34).

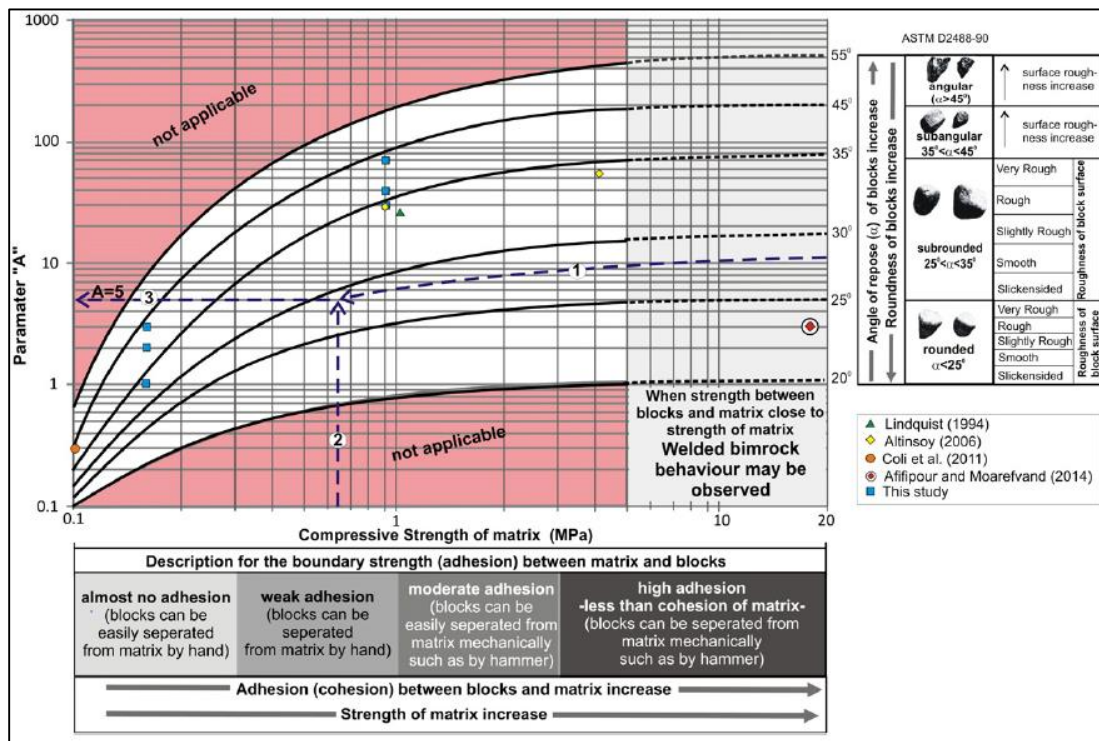


**Figura 2-34.** Efecto de la forma y orientación de los bloques en la estabilidad de taludes. Tomado de (Medley & Rehmann, 2004).

Por otro lado, (Kalender, Sonmez, Medley, Tunusluoglu, & Kasapoglu, 2014) propusieron un criterio preliminar para determinar la resistencia al corte de los *bims* en función de parámetros como la proporción volumétrica y forma de los bloques, el ángulo de fricción, la cohesión y la resistencia a la compresión simple de la matriz. Para cuantificar el efecto de los bloques en la resistencia, los autores propusieron un ábaco que permite encontrar un parámetro  $A$ , con el cual se puede obtener la resistencia a la compresión simple  $UCS_{bim}$  de los *bims*, usando la ecuación que se muestra en la Figura 2-35. En la Figura 2-36, se observa que para bloques angulares, el valor de  $A$  es mayor; y por ende lo es también el valor de  $UCS_{bim}$ .



**Figura 2-35.** Diagrama de flujo para determinar la resistencia al corte de un *bim*. Tomado de (Kalender, Sonmez, Medley, Tunusluoglu, & Kasapoglu, 2014).



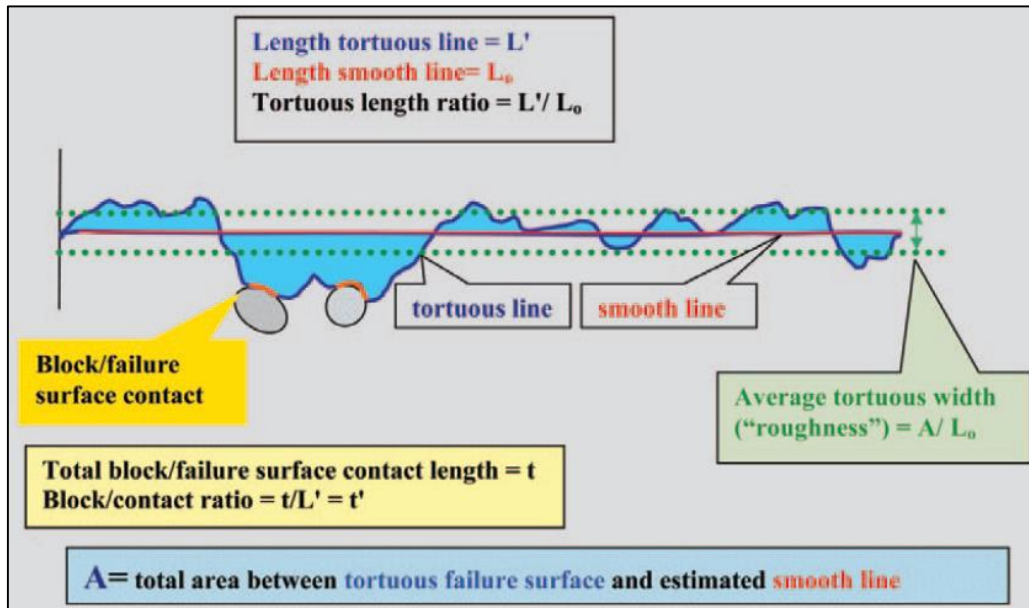
**Figura 2-36.** Ábaco para seleccionar A en función de la resistencia de la matriz y la forma de los bloques.

Tomado de (Kalender, Sonmez, Medley, Tunusluoglu, & Kasapoglu, 2014).

Caso contrario ocurre para los bloques redondeados, los cuales están asociados a un menor valor de  $A$ . En conclusión, según el criterio de (Kalender, Sonmez, Medley, Tunusluoglu, & Kasapoglu, 2014), bloques angulares aportan más a la resistencia de los *bims*, que los bloques redondeados.

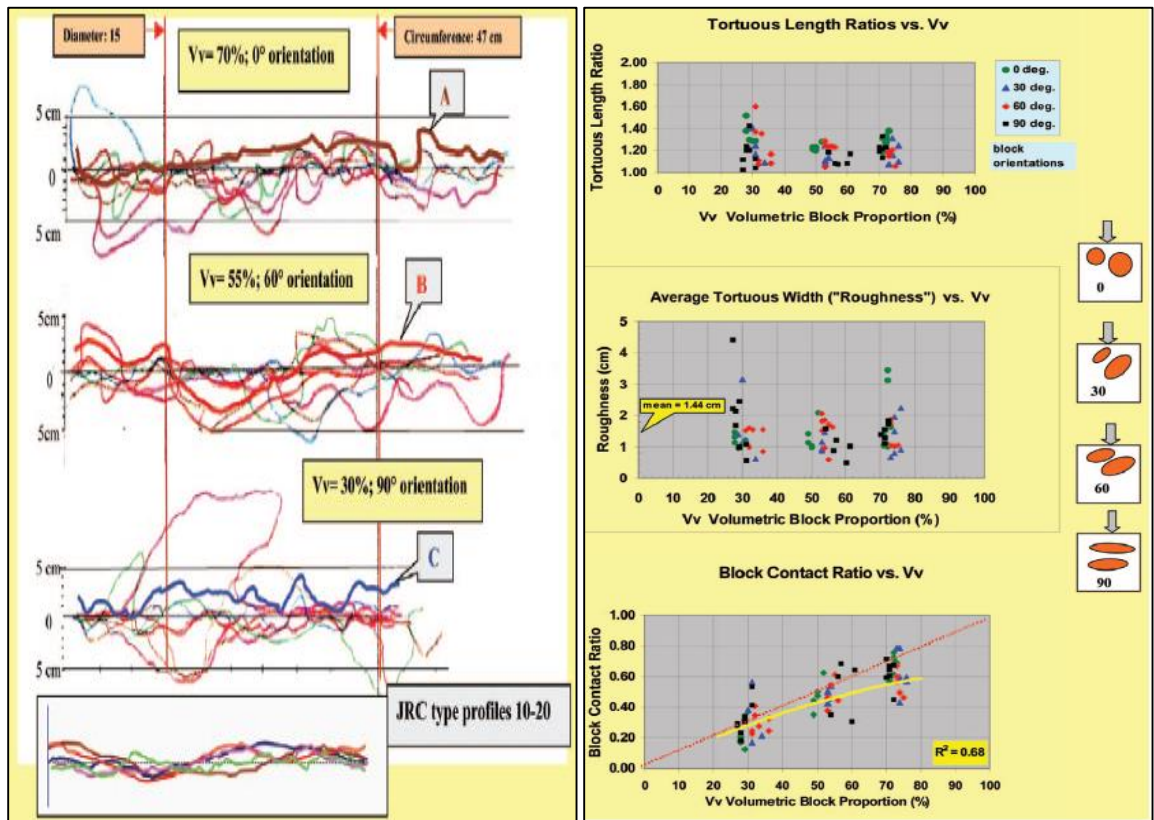
#### ▪ Tortuosidad de la superficie de falla

Los *bims* se caracterizan por tener una superficie de falla tortuosa, la cual se presenta a través de la matriz y esquivando los bloques. (Medley E. , 2004) estudió la tortuosidad de la superficie de fallas de las muestras fabricadas y falladas en los experimentos realizados por (Lindquist E. S., 1994). Para ello, calcó la superficie de cada espécimen y midió parámetros como la longitud de la línea tortuosa  $L'$ , la longitud de la línea lisa  $L_0$ , la relación  $L'/L_0$ , el área entre la superficie tortuosa y la línea lisa  $A$ , el ancho promedio de la rugosidad, entre otros (Ver Figura 2-37).



**Figura 2-37.** Parámetros medidos y calculados del calcado de la tortuosidad de las superficies de falla.  
 Tomado de (Medley E. , 2004).

De la investigación, se encontró que la relación  $L'/L_o$  y la rugosidad son sumamente variables y no están muy relacionados con la proporción volumétrica de bloques  $VBP$ . Por otro lado, se encontró que la metodología del "Joint Roughness Coefficients – JRC" (Barton & Choubey, 1997), el cual es un parámetro que mide la rugosidad de las discontinuidades y sirve para obtener la resistencia al corte de las mismas, no es aplicable a *bims*. El estudio mostró que las superficies falla que se generan en los *bims* son más rugosas que las esperadas en la caracterización de juntas en roca. Por otro lado, se encontró que el ancho de la zona de falla varía entre un 5% y 15% de la longitud característica  $L_c$ , según los resultados compilados del estudio (Ver Figura 2-38).



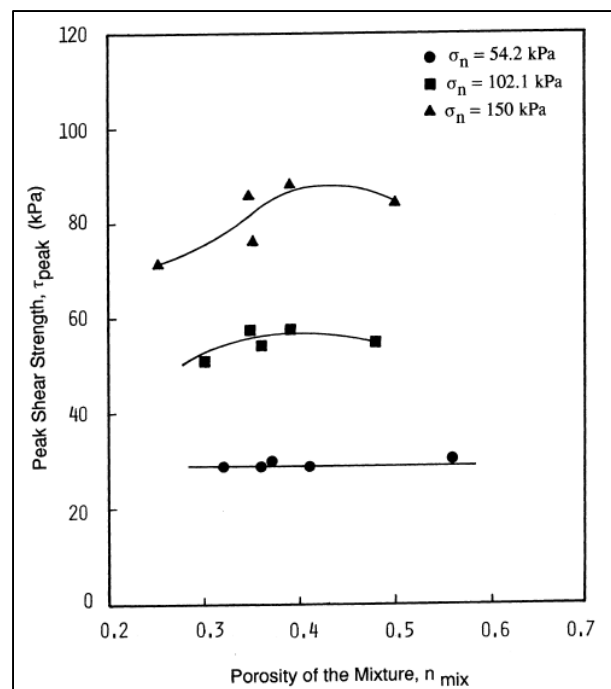
**Figura 2-38.** Superficies de falla calcadas de muestras de *bims* (izquierda) y gráficos de la proporción de bloques en función de los parámetros medidos (derecha). Tomado de (Medley E. , 2004).

- **Densidad**

El efecto de la densidad en el comportamiento mecánico de suelos granulares ha sido ampliamente investigado por diversos autores ( (Marsal, 1967), (Boughton, 1970), (Sarac

& Popovic, 1985), (Rollins, Evans, Diehi, & Daily III, 1998), (Tosun, Mirata, Mollamahmutoglu, & Colakoglu, 1999), (Hamidi, Alizadeh, & Soleimani, 2009) apud (Nanclares, 2018)); sin embargo, en mezclas de suelo y roca esta propiedad no ha sido tan investigada, centrándose las investigaciones en otras propiedades como las ya mencionadas.

Por ejemplo, (Vallejo & Mawby, 2000) estudiaron el efecto de la porosidad (la cual está íntimamente ligada a la densidad) en la resistencia al corte de mezclas de material granular (arena de Ottawa) y suelo fino (arcilla). Los resultados mostraron que los menores valores de porosidad se encontraron para una proporción promedio de arenas, en peso, en torno al 76%. Por encima del 76% el comportamiento de la mezcla es controlado por la fracción granular, mientras que para concentraciones de arena por debajo de 40% la resistencia al corte de la mezcla es básicamente igual a la de la arcilla. Lo anterior es consistente con lo encontrado para los *bims*, en donde para proporciones volumétricas de bloques por encima del 75% el comportamiento de la masa se asemeja al de un macizo fracturado, y por debajo del 25% la resistencia es similar a la de la matriz.



**Figura 2-39.** Resistencia pico de mezclas de arena-arcilla en función de la porosidad. Tomado de (Vallejo & Mawby, 2000).



Por otro lado, los resultados arrojaron que las resistencias pico medidas en las mezclas generalmente están bien correlacionadas con el rango de los valores mínimos de porosidad. Este efecto se potencia para confinamiento mayores, conforme se muestra en la Figura 2-39.

Por otro lado, (Nanclares, 2018) también estudió la influencia de la densidad en la resistencia de mezclas remoldeadas suelo-roca de origen aluvial. Para ello realizó ensayos de corte directo y compresión triaxial; en donde las muestras ensayadas fueron compactadas a un peso unitario de  $23 \text{ kN/m}^3$  y  $20 \text{ kN/m}^3$ , respectivamente. Los resultados arrojaron diferencias de entre  $15^\circ$  y  $20^\circ$  en el ángulo de fricción entre las muestras ensayadas en el equipo de corte directo (material más denso) y la cámara triaxial (material menos denso). Es importante adicionar que, por el mecanismo de falla, se ha encontrado diferencias entre los valores del ángulo de fricción obtenidos de ensayos de corte y triaxiales. Para arenas densas la diferencia se encuentra en un rango entre  $4^\circ$  y  $9^\circ$ ; mientras que en arenas sueltas, la diferencia está en torno a  $2^\circ$  y  $4^\circ$  (Holtz & Kovacs, 1981) apud (Nanclares, 2018)). Sin embargo, la diferencia encontrada por (Nanclares, 2018) es muy superior, lo cual se explica por el efecto favorable de la densidad en la resistencia al corte de los *bims*.

### **2.2.5 Consideraciones generales sobre la resistencia de los bimrocks/bimsoils**

En las secciones anteriores se describieron las características de los *bims*, al igual que los aspectos que se deben tener en cuenta para caracterizarlos. Entre ellos, se deben considerar aspectos como los descritos en la Figura 2-40. Adicionalmente, también se trataron las propiedades que tenían mayor incidencia en la resistencia al corte de estos materiales. En esta sección se presenta un resumen de los conceptos más importantes.

Se ha encontrado a partir de las múltiples investigaciones, que uno de los parámetros que mayor incidencia tiene en la resistencia es el de la proporción de bloques. Esta afecta de manera diferente en el caso que se esté estudiando un *bimrock* (matriz soldada) o un *bimsoil* (matriz de suelo). Para el primer caso, un incremento en la proporción de bloques significa un aumento en la cohesión  $c$  y el ángulo de fricción  $\phi$  del material, independiente

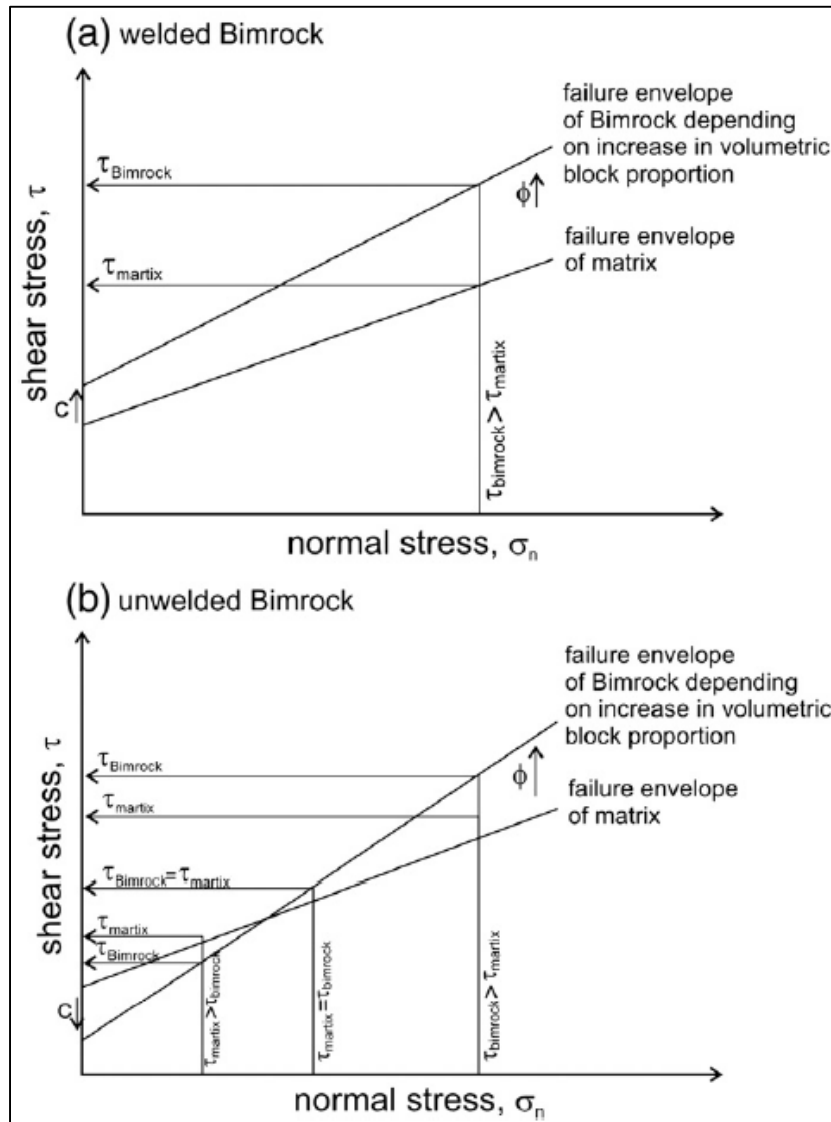
del esfuerzo normal actuante (Ver Figura 2-41). Sin embargo, en el caso de los *bimsoil*, se ha encontrado que, para proporciones de bloque mayores, se presenta un aumento en el ángulo de fricción  $\phi$  y una reducción en la cohesión  $c$ . Lo anterior se traduce en que, para esfuerzos bajos de confinamiento, la resistencia al corte de la matriz pueda superar a la del *bimsoil* (Ver Figura 2-41).

Characterization	Design/analysis	Construction
<u>Common to all civil engineering works</u>		
Identify unusual lithologies	Decide soil engineering, rock engineering, or bimrock approaches on basis of volumetric block proportions	Anticipate possible considerable differences between site conditions as characterized and conditions encountered in construction
Drill rock core using triple tube samplers; shrink wrap core	Evaluate potential destabilizing effects of large blocks, block and matrix discontinuity fabrics, shears, block orientations, and shapes	Review equipment limitations and handling of oversize blocks, fragmentation, rippability, and excavatability of very hard blocks
Measure block linear proportions from core and mapping scan lines	Evaluate variable groundwater conditions in blocks and matrix	Plan for possible unexpected large pressurized groundwater flows when blocks are penetrated
Beware of optimistic cross sections	Predict long-term performance of rock mass	
Perform triaxial strength testing at differing block proportions	Evaluate how block proportions, size distributions, lithology, and individual block and matrix strengths affect construction method and performance	
<u>Slopes, excavations, and dams</u>		
Perform direct shear tests on discontinuities and/or matrix	Assess destabilizing effect of stress and groundwater concentrations	Monitor short-term stability of excavated rock with abruptly variable shear fabric
Map critical failure surfaces	Analyze stabilizing/destabilizing effects of block orientations	Consider leaving large blocks to protrude at grade or incorporate block stick-ups into the work
	Anticipate through-going shears in matrix and/or blocks	Monitor potential for block fallouts
<u>Tunnels, pipelines, and underground spaces</u>		
Anticipate that observed ground conditions may provide little basis for accurate subsurface profiles and geological characterization along tunnel alignments	Analyze stress and groundwater effects of encountering unexpected large blocks	Select equipment and construction procedures flexible enough to accommodate possible extreme mixed-face conditions
	Analyze effect of short stand-up times, squeezing ground in weak matrix	Develop procedures for penetrating large, extremely hard blocks, and handling many intact, small blocks
	Develop detailed geotechnical observation method protocol	Perform detailed face mapping and real-time analysis of ground deformation data

**Figura 2-40.** Consideraciones a la hora de trabajar con *bimrocks*. Tomado de (Medley & Zekkos, 2011).

Uno de los trabajos más completos en cuanto a la resistencia de los *bims* fue realizado por (Kalender, Sonmez, Medley, Tunusluoglu, & Kasapoglu, 2014); los cuales recopilan diferentes aspectos que inciden en la resistencia. Por ejemplo, en la medida en que aumenta la proporción de bloques en *bims* con matriz no soldada, el ángulo de fricción  $\phi$  incrementa, tendiendo a ser igual al ángulo de reposo  $\alpha$  de los bloques. Por otro lado, la cohesión  $c$  y la resistencia a la compresión simple *UCS* disminuyen y tienden a cero para proporciones volumétricas de bloques *VBP* del 100% (Ver Figura 2-42).

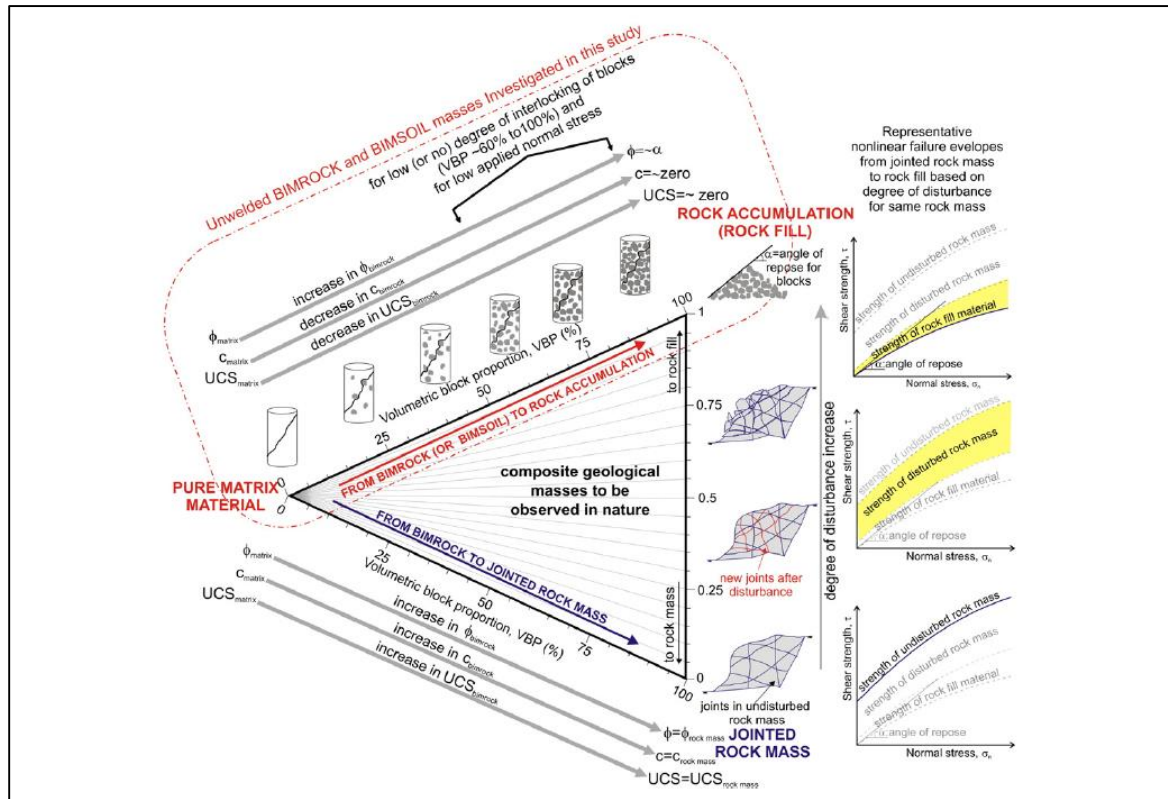




**Figura 2-41.** Ilustración esquemática de la resistencia al corte para *bims* con matriz soldada (arriba) y no soldada (abajo).

Tomado de (Kalender, Sonmez, Medley, Tunusluoglu, & Kasapoglu, 2014).

En este caso, el material pasa de ser pura matriz ( $VBP = 0\%$ ), a una acumulación de bloques de roca ( $VBP = 100\%$ ). Para el caso de los *bims* con matriz soldada, el comportamiento pasa de ser pura matriz, al de asimilarse a un macizo rocoso fracturado ( $VBP = 100\%$ ). Para este caso, en la medida que aumenta la proporción de bloques, incrementa la fricción  $\phi$ , la cohesión  $c$  y la resistencia a la compresión simple  $UCS$ , tendiendo a ser las propiedades del macizo (Ver Figura 2-42).



**Figura 2-42.** Esquema de los factores que influyen en la resistencia de los *bimsoils* y *bimrocks*.

Tomado de (Kalender, Sonmez, Medley, Tunusluoglu, & Kasapoglu, 2014).

## Capítulo 3

### 3. Metodología de trabajo

En los capítulos anteriores se describieron varios mecanismos a través de los cuales se puede dar origen a geomantas con presencia de bloques, embebidos en matriz de suelo. Adicionalmente, se establecieron las principales características y los retos que presentan estos geomateriales en su proceso de caracterización. Debido a ello, se expuso como múltiples autores han propuesto diferentes metodologías que permitan tener un mejor entendimiento del comportamiento mecánico de estos materiales, pudiendo en algunas investigaciones, establecer relaciones entre parámetros de resistencia al corte, con diferentes propiedades físicas. Se destacó el enfoque de los denominados “*bims*”, el cual propone que el comportamiento geomecánico de las geomantas se ve afectado por la presencia de bloques, los cuales generan un incremento en la resistencia.

A pesar de que existen investigaciones de vieja data que tuvieron como objeto entender mejor el comportamiento de materiales granulares, hasta la fecha, no se ha profundizado en el estudio de las mezclas suelo-roca, como se ha hecho con otros geomateriales como lo son los suelos cohesivos, las arenas y la roca. Sin embargo, en las últimas décadas surgió el enfoque de los *bims* para entender mejor los geomateriales que se caracterizan por tener bloques embebidos en matriz de suelo.

De acuerdo a lo anterior, este trabajo de investigación pretende mejorar el conocimiento del comportamiento geomecánico de mezclas suelo-roca, al igual que determinar la

relación de ciertas propiedades físicas, como lo son la forma de los bloques, la proporción volumétrica de bloques *VBP* y la gradación, con la resistencia al corte de la masa.

Para lograr lo anterior se llevó a cabo un trabajo investigativo y experimental, el cual incluyó recolección de información proveniente de la literatura técnica y la ejecución, en campo, de ensayos no convencionales. Estos últimos sirvieron para validar las relaciones encontradas. El detalle de las actividades realizadas se explica, con mayor detalle, a continuación.

### 3.1 Actividades

La metodología incluyó las siguientes actividades, las cuales se listan en orden cronológico.

- Recolección de información publicada correspondiente a resultados de ensayos de grandes dimensiones, sobre mezclas de suelo y roca, realizados para establecer la resistencia al corte. La información recolectada, incluye curvas esfuerzo deformación, parámetros de resistencia al corte y curvas granulométricas. La fuente y procedencia de los datos recopilados se presenta con detalle en la sección 3.2 (Ver Tabla 3-1).
- Digitalización y procesamiento de la información compilada.
- Obtención de parámetros de resistencia al corte a partir de los datos compilados. Para ello se implementó el criterio de falla de Mohr-Coulomb.
- Determinación del diámetro de partícula que supone el límite entre matriz y bloque. Para ello se hizo uso de las metodologías propuesta por Medley y por Nanclares (Ver sección 2.2.2). Este valor permite determinar, a partir de las curvas granulométricas, la proporción volumétrica de bloques (*VBP*).

- Determinación de parámetros físicos de los materiales estudiados. Estos fueron obtenidos de las curvas granulométricas e incluyen diámetros característicos ( $D_{10}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{75}$ ,  $D_{90}$ ) y coeficientes de uniformidad ( $C_u$ ) y curvatura ( $C_c$ ).
- Determinación de la forma de los bloques. Esta se hizo a partir del origen del material y según la descripción dada en los informes, artículos y documentos académicos.
- Procesamiento de datos de ensayos y análisis de resultados. Se agruparon los datos compilados de tal forma que se pudiera evidenciar el efecto, en la resistencia, de cada una de las variables analizadas.
- Propuesta de correlaciones que permitan obtener parámetros de resistencia al corte, en función de las propiedades físicas de los geomateriales analizados.
- Selección de sitio para ensayos no convencionales *HCT* (*Hydraulic Cylinder Test*). Los lugares se escogieron buscando analizar geomateriales de distintos orígenes (depósitos aluvial y de vertiente).
- Realización de ensayos no convencionales *HCT*. Estos se realizaron en el barrio Las Vegas del municipio de Envigado, específicamente en la obra en construcción “Distribuidora Sur”. El otro ensayo se realizó en el barrio Palenque del municipio de Medellín, específicamente en la finca “Las Mercedes” de la Facultad de Minas.
- Toma de muestras remoldeadas para realización de ensayos de clasificación y propiedades índice. También se extrajeron muestras de alta calidad en tubo de pared delgada o shelby, para realización de ensayos de resistencia sobre la matriz.
- Obtención de parámetros de resistencia del material ensayado con prueba *HCT*, a partir de calibración de curvas esfuerzo-deformación en programa tridimensional de elementos finitos (Plaxis B.V., 2004).

- Validación de las correlaciones propuestas a partir de los resultados de los ensayos en campo.

### 3.2 Recopilación y análisis de información secundaria

Esta actividad involucró la recolección de información de la resistencia a la corte obtenida de 40 materiales a partir de ensayos de compresión triaxial de gran dimensión. Como se ha mencionado, la información se obtuvo de la literatura técnica, tomando datos de cinco (5) artículos académicos, dos (2) informes técnicos, un (1) libro y una (1) tesis doctoral. Los datos obtenidos de informes técnicos corresponden a ensayos realizados para proyectos de ingeniería, tales como el proyecto hidroeléctrico Pescadero-Ituango y el embalse Toná. Esta información fue usada con la autorización de EPM y de Integral S.A.

En la Tabla 3-1 se listan los documentos estudiados y la codificación de los materiales, según la fuente bibliográfica o la procedencia de la información utilizada. Este código se usará a partir de ahora para referirse a un material en específico.

**Tabla 3-1.** Codificación y fuentes bibliográficas de los materiales estudiados.

Código de la fuente	Fuente
1	(Indraratna, Wijewardena, & Balasubramaniam, 1993)
2	(AtashBahar, Jamshidi chenari, & Lashtenashaie, 2015)
3	(Sharma, Venkatachalam, & Roy, 1994)
4	Elaboración propia a partir de información facilitada por EPM e Integral (Proyecto Hidroeléctrico Ituango)
5	(US Bureau of Reclamation, 1966)
6	(Holtz & Ellis, 1961)
7	(Nanclares, 2018)
8	Elaboración propia a partir de información facilitada por EPM e Integral (Proyecto Toná)
9	(Marsal, 1967)

Elaboración propia

### 3.3 Ensayos mecánicos

La información secundaria recolectada se centró en la búsqueda de ensayos mecánicos para caracterizar geomallas con mezclas de bloques en matriz de suelo. Todos los

resultados fueron obtenidos a partir de ensayos no convencionales de compresión triaxial de gran dimensión. A continuación, se describe la metodología típica de ensayo y los equipos utilizados.

### 3.3.1 Ensayo de Compresión Triaxial

Este ensayo consiste en aplicar inicialmente una carga de confinamiento sobre una muestra cilíndrica. La carga actúa en todas las direcciones de la muestra, se mantiene constante durante la etapa de falla y se aplica presurizando un fluido, el cual normalmente es agua. Tras alcanzar la consolidación de la muestra, se aplica una carga en el mismo sentido de la mayor dimensión de la muestra, que se incrementa hasta la falla del espécimen.

Esta fuerza es la que genera la falla, y la diferencia entre esta y la presión confinante se conoce como esfuerzo desviador. La ventaja de este ensayo, en comparación con el de corte directo, es que no se restringe el plano de falla, por lo que normalmente se representa de manera más precisa el comportamiento real del material. Adicionalmente, este ensayo permite conocer todo el estado tensional del suelo al momento de la falla, pudiéndose encontrar los esfuerzos principales.

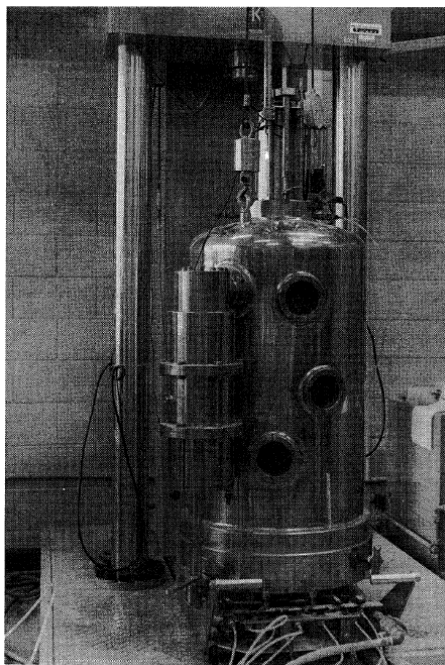
La velocidad de aplicación de la falla depende de la modalidad de ensayo, pudiendo ser consolidado o no consolidado. De igual forma, según el tipo de prueba, se puede permitir o no el drenaje de agua, siendo el ensayo drenado o no drenado.

Los ensayos convencionales de compresión triaxial se desarrollan siguiendo los lineamientos establecidos en la Norma *ASTM D7181 "Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils"* (Método Estándar de Ensayo para Pruebas de Compresión Triaxial Consolidado Drenado sobre Suelos), *ASTM D4767 "Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Soils"* (Método Estándar de Ensayo para Pruebas de Compresión Triaxial Consolidado No Drenado sobre Suelos) y *ASTM D2850 "Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils"* (Método Estándar de Ensayo para Pruebas de Compresión Triaxial No Consolidado- No Drenado sobre Suelos Cohesivos).

A continuación se presenta el equipo utilizado en cada una de las referencias presentadas en la Tabla 3-1.

▪ **Equipo utilizado para Fuente 1 (Indraratna, Wijewardena, & Balasubramaniam, 1993)**

En este caso, se utilizó un equipo de ensayos triaxiales de gran escala, que permitió evaluar el comportamiento de muestras de  $0,30\text{ m}$  de diámetro y  $0,60\text{ m}$  de altura. Dicho equipo está compuesto básicamente por seis (6) partes: la cámara triaxial, la unidad de carga vertical, la unidad de control de presión de agua y presión del aire, la bomba hidráulica, la unidad de servo-control y el sistema digital de toma de datos. Con el fin de confinar las muestras cilíndricas, se utilizaron membranas de goma de  $3\text{ mm}$  de espesor. Por su parte, los esfuerzos de confinamiento de los ensayos variaron desde  $100\text{ kPa}$  hasta  $600\text{ kPa}$ , con intervalos de  $100\text{ kPa}$ .



**Figura 3-1.** Equipo triaxial de gran dimensión usado para los ensayos de la Fuente 1. Tomado de (Indraratna, Wijewardena, & Balasubramaniam, 1993).

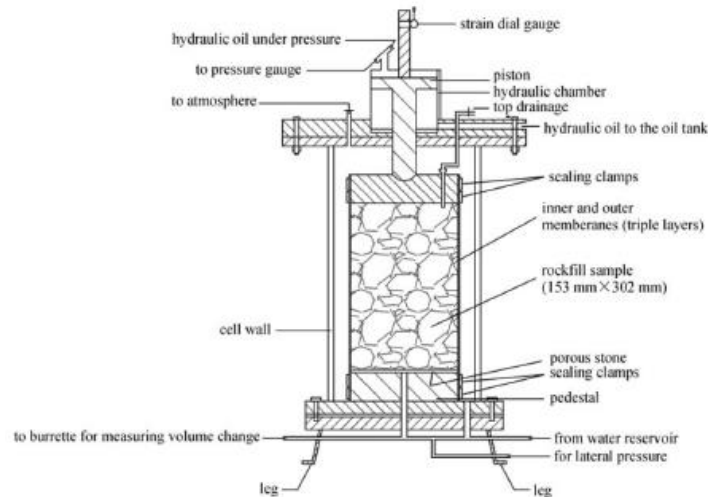
Las muestras ensayadas fueron compactadas con un vibro compactador manual dentro de las membranas protectoras en varias capas, cuyos espesores oscilaron entre  $50\text{ mm}$  y  $60\text{ mm}$ . El contenido de agua en las muestras fue del orden del 5%, mientras que la



densidad seca media de las muestras fue de  $18,5 \frac{kN}{m^3}$ . En la Figura 3-1 se muestra una fotografía del equipo utilizado.

- **Equipo utilizado para ensayos de Fuente 2 (AtashBahar, Jamshidi chenari, & Lashtenashaie, 2015)**

Las muestras ensayadas, de  $153 \text{ mm}$  de diámetro, se prepararon siguiendo los estándares modificados del ensayo proctor. El tamaño máximo de las partículas ensayadas fue  $25 \text{ mm}$  y los esfuerzos de confinamiento fueron  $0,05, 0,1, 0,3, 0,5$  y  $0,7 \text{ MPa}$ . En la Figura 3-2 se muestra un esquema del equipo.



**Figura 3-2.** Esquema del equipo triaxial de gran dimensión usado para los ensayos de la Fuente 2.

Tomado de (AtashBahar, Jamshidi chenari, & Lashtenashaie, 2015).

- **Equipo utilizado para ensayo de Fuente 3 (Sharma, Venkatachalam, & Roy, 1994)**

Se realizaron ensayos triaxiales drenados y pruebas de compresión unidimensionales. Dichos ensayos se realizaron en tres fracciones de material con tamaños de partícula máximos de  $25, 50$  y  $80 \text{ mm}$  respectivamente. Las muestras fueron remodeladas a una densidad seca correspondiente al  $87\%$  de la densidad relativa alcanzada para cada uno de los tres materiales de tamaño máximo. Las muestras triaxiales de  $381 \text{ mm}$  de diámetro

y 813 *mm* de altura se consolidaron y se ensayaron bajo cuatro presiones de confinamiento diferentes que variaron desde 350 *kPa* hasta 1400 *kPa*.

▪ **Equipo utilizado para ensayos de Fuentes 4, 7 y 8 (Nanclares, 2018)**

El equipo utilizado consiste en una cámara de acero de 48 *cm* de diámetro interno, 53 *cm* de diámetro externo y 83 *cm* de altura, con capacidad de alojar una muestra de 30 *cm* de diámetro y 60 *cm* de altura. La cámara permite, a través de válvulas, el monitoreo de presiones y la expulsión de aire y agua de la muestra; al igual que la saturación con agua de la misma.

La carga axial aplicada a la muestra se hace a través de una prensa hidráulica capaz de aplicar 2000 *kN* de fuerza y cuyo marco permite la acomodación de la cámara de ensayo. La prensa posee un manómetro de carátula anexo al equipo, lo que permite medir la carga aplicada. El esfuerzo de confinamiento se aplica mediante una bomba de agua externa con capacidad de aplicar y sostener hasta 2 *MPa* de presión.

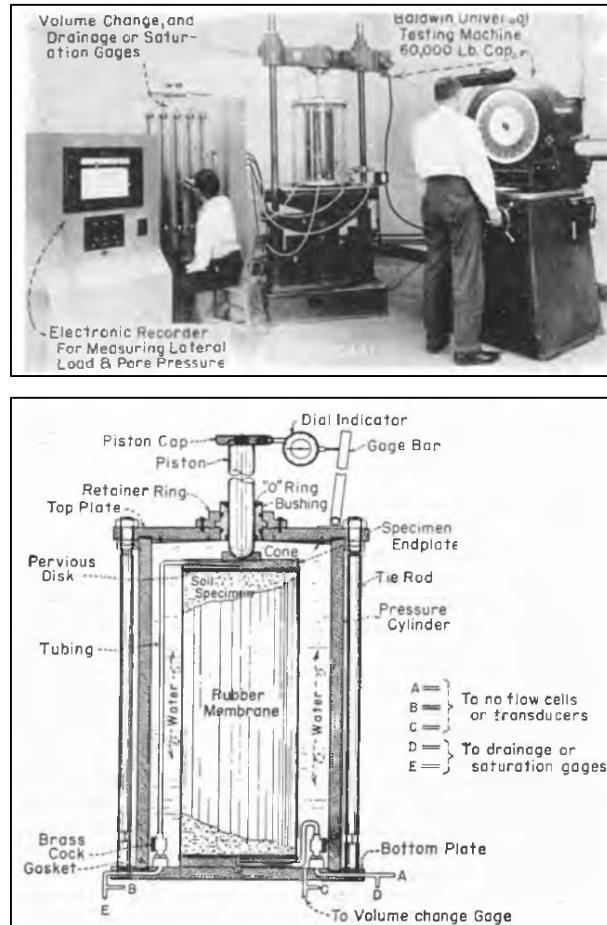


**Figura 3-3.** Equipo triaxial de gran dimensión usado para los ensayos de las Fuentes 4, 7 y 8.

Tomado de (Nanclares, 2018).

La tasa de deformación de la muestra o la tasa de desplazamiento del elemento de carga se controla manualmente, es decir, mediante la medición de la deformación utilizando extensómetros de carátula y el registro del tiempo (Nanclares, 2018). En la Figura 3-3 se presenta el equipo y montaje utilizado.

- Equipo utilizado para ensayos de Fuente 5 y 6 (US Bureau of Reclamation, 1966), (Holtz & Ellis, 1961)



**Figura 3-4.** Equipo triaxial de gran dimensión usado para los ensayos de las Fuentes 5 y 6.

Tomado de (US Bureau of Reclamation, 1966), (Holtz & Ellis, 1961).

Todas las muestras ensayadas en este estudio fueron de 9 pulgadas de diámetro y 22,5 pulgadas de largo. El equipo de ensayo cuenta con un medidor automático del esfuerzo-deformación del ensayo y de las tasas de esfuerzo y deformación. La cámara de presión fue diseñada para una presión lateral máxima de 150 *psi*. En la Figura 3-4 se muestra la fotografía y esquema del equipo utilizado.

▪ **Equipo utilizado para ensayos de Fuente 9 (Marsal, 1967)**

El equipo utilizado en la investigación realizada por Marsal comprende de dos cámaras triaxiales de gran tamaño: una para presiones de confinamiento altas y otra para presiones de confinamiento bajas.

- *Cámara triaxial para altas presiones de confinamiento:*

El aparato, tal como se observa en la Figura 3-5, consta de una cámara esférica de acero con un marco de cargas en su interior. La presión de confinamiento máxima es de  $25 \text{ kg/cm}^2$  y la capacidad de carga axial es de  $1500 \text{ ton}$ . Los especímenes que se ensayan tienen  $1,13 \text{ m}$  de diámetro y  $2,50 \text{ m}$  de altura.

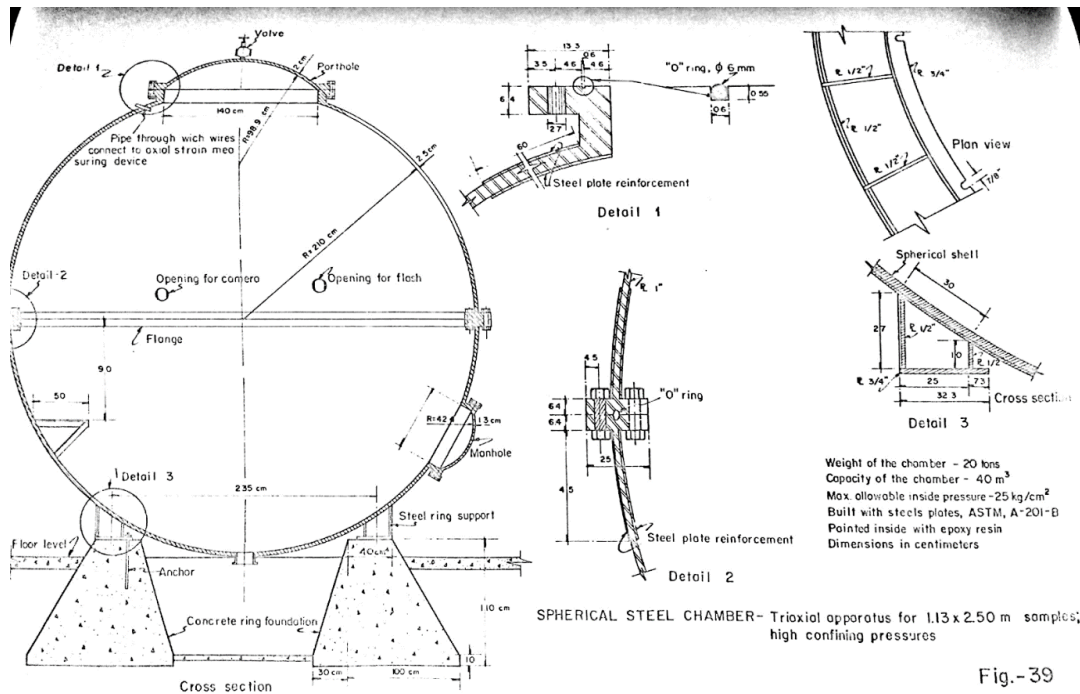


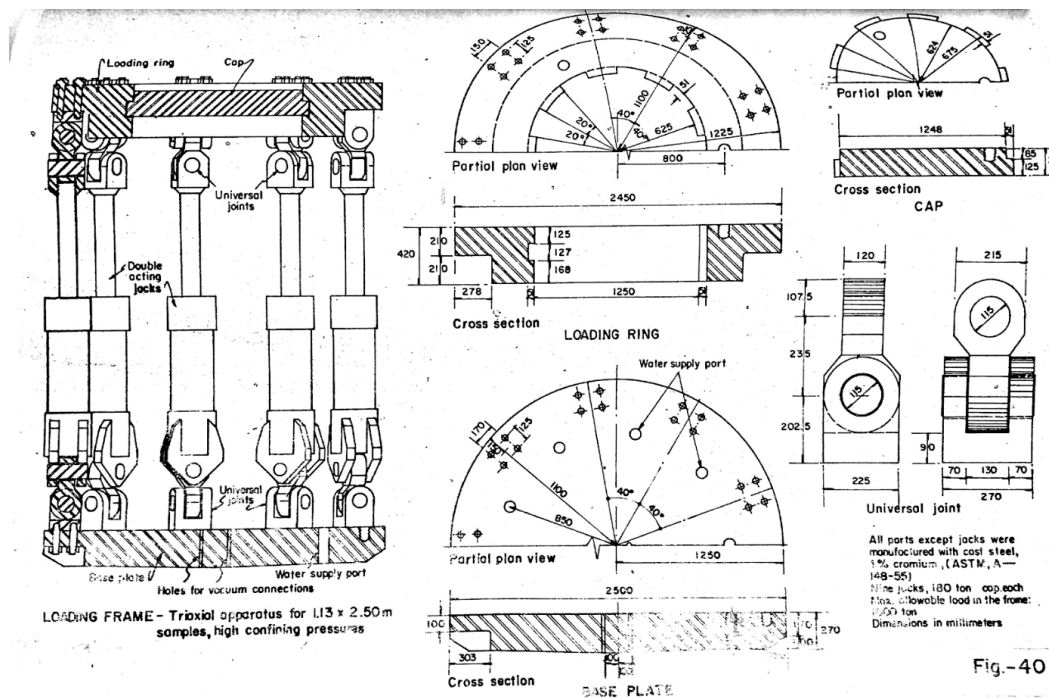
Fig.-39

**Figura 3-5.** Cámara esférica de acero del equipo de compresión triaxial de gran escala para los ensayos de la Fuente 9. Tomado de (Marsal, 1967).

La celda esférica de presión tiene  $4,20 \text{ m}$  de diámetro y está construido con placas de acero de  $2,5 \text{ cm}$  de espesor. La esfera está dividida en dos mitades que se conectan por medio de dos bridas o riendas de  $7,5 \text{ cm}$  de espesor. En la parte superior de dicha esfera se encuentra un orificio de  $1,40 \text{ m}$  de diámetro que permite introducir los materiales en el interior de la cámara. Alrededor de dicha cámara se ubican diferentes agujeros que permiten la instalación de cámaras fotográficas o lámparas electrónicas. Un agujero de

60 cm de diámetro, ubicado en el hemisferio inferior de la cámara, permite la ejecución de las actividades previas a cada ensayo

Por su parte, el marco de carga, que se muestra en la Figura 3-6, está constituido por un cabezal, un anillo de carga, nueve gatos hidráulicos y una base. El cabezal, el anillo y la base fueron fabricados con acero, mientras que los gatos hidráulicos están unidos por medio de unas juntas universales, tanto al anillo de carga como a la base.



**Figura 3-6.** Marco de cargas del equipo triaxial de gran escala para los ensayos de la Fuente 9. Tomado de (Marsal, 1967).

Cada gato hidráulico tiene una capacidad de 180 ton y una carrera de vástago de 75 cm. Tres bombas de aceite con sus correspondientes válvulas están conectadas a grupos de tres gatos de manera independiente, aumentando así la precisión de las medidas de carga axial, al usar uno, dos o los tres grupos de gatos. Además, tres grupos de manómetros permiten determinar las cargas aplicadas por cada grupo de gatos

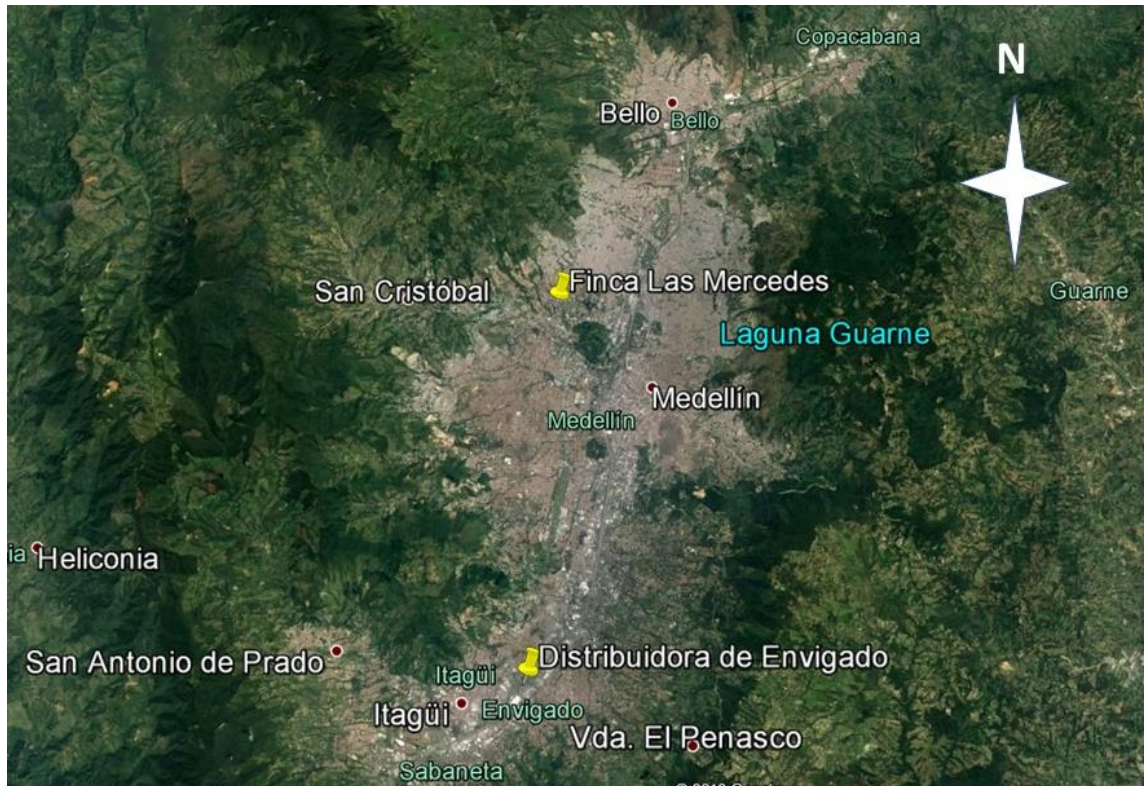
El sistema hidráulico que genera la presión de confinamiento sobre la muestra de ensayo se compone de dos partes: una bomba que permite llenar la cámara esférica y un conjunto de tanques, tuberías y bombas que permiten alcanzar presiones de confinamiento de 2, 5,



10, 17 y 25  $kg/cm^2$ , aproximadamente, por medio de diferencias de nivel entre la cámara y los tanques.

### 3.4 Sitios para ensayos in-situ HCT

Para la realización de los ensayos in situ se seleccionaron dos (2) lugares en donde se pudiera encontrar el material de interés; es decir geomاسas compuestas por bloques de roca embebidos en matriz de suelo (*bimsoils*). En la Figura 3-7 se presenta una localización dentro del Valle de Aburrá de los sitios seleccionados para las pruebas.

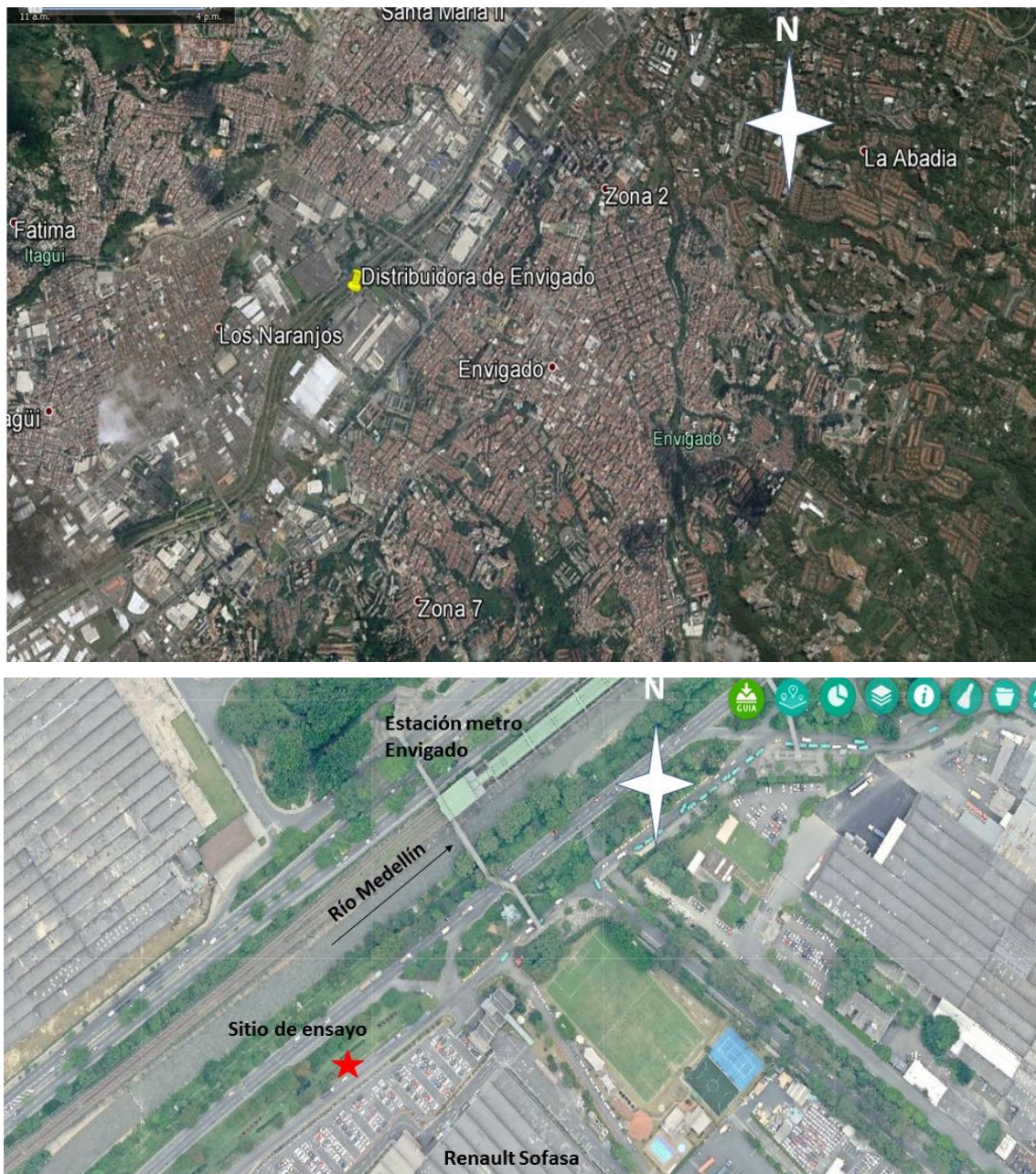


**Figura 3-7.** Localización sitios para realización de ensayos in situ HCT. Elaboración propia a partir de. (Google, 2019).

Se procuró que la forma de los bloques de un lugar fuera diferente de las del otro, permitiendo analizar el efecto de esta variable en la resistencia al corte de estos materiales. En cada sitio se realizaron varios ensayos. Para ello se buscó que una de las pruebas se realizara sobre un depósito aluvial, en donde los bloques fuesen predominantemente redondeados. Esta forma es favorecida por el proceso que ha sufrido el sedimento, el cual



ha sido transportado y pulido por el agua. Debido a ello, se seleccionó para la realización de uno de los ensayos el depósito aluvial del río Medellín. Específicamente el ensayo se realizó dentro de las obras que se adelantan para la construcción de la distribuidora de Envigado, sector de Sofasa (coordenadas geográficas  $6^{\circ}10'21.92''N - 75^{\circ}35'54.39''W$ ). La ubicación en planta de la zona de estudio se muestra en la Figura 3-8.



**Figura 3-8.** Localización realización ensayo en Distribuidora de Envigado. Elaboración propia a partir de (Google, 2019) y (hyg consultores sas, 2015).

A pesar de que como se mencionó en el párrafo anterior, el sitio de ensayo se seleccionó buscando encontrar un depósito aluvial, al momento de excavar la trinchera donde se ejecutaron las pruebas, el material encontrado fue un lleno antrópico, con presencia de bloques subangulares y subredondeados, predominando estos últimos.

El otro ensayo se realizó en geomateriales transportados, asociados a depósitos de vertiente del tipo lodos y escombros, con fuentes de aporte cercanas para garantizar la angularidad de los fragmentos. Este tipo de depósitos se caracteriza por presentar materiales gruesos embebidos en matriz limo arenosa.

Teniendo en cuenta la exploración del sitio seleccionado, se encontró la presencia en el depósito de fragmentos con litologías metagabroicas y con fragmentos angulosos. Estos se pudieron asociar con la unidad litológica in situ ubicada en la parte alta de la vertiente, a menos de 3 *km* vertiente arriba; lo cual, junto con la forma angulosa de los fragmentos y la baja alteración de minerales como la plagioclasa, permitió inferir el bajo transporte que ha tenido hasta su deposición al sitio de estudio. Lo anterior garantiza la idoneidad para los fines del presente estudio.

Específicamente el ensayo se realizó en los predios de la Facultad de Minas, adyacente a la Finca "Las Mercedes" (coordenadas geográficas 6°16'33.66"N – 75°35'32.05"W). La ubicación en planta de la zona de estudio se presenta en la Figura 3-9.





**Figura 3-9.** Localización realización ensayo en Finca Las Mercedes.  
Elaboración propia a partir de (Google, 2019) y (hyg consultores sas, 2015).

### 3.5 Ensayo no convencional *HCT* (Hydraulic Cylinder Test)

Este ensayo fue propuesto por (González-Nicieza, Prendes-Gero, Fernandez-Rodriguez, & Lopez-Gayarre, 2013) para la caracterización geotécnica de macizos rocosos muy fracturados. La prueba consiste en la aplicación de una carga al terreno usando un cilindro hidráulico y midiendo la deformación producida la misma.

El ensayo tiene múltiples ventajas, entre las que se destacan su facilidad de implementación, dado que, en comparación con otras pruebas in-situ (corte directo, ensayo de placa, presiodilatómetros), la logística del ensayo solo requiere la excavación de una trinchera (González-Nicieza, Prendes-Gero, Fernandez-Rodriguez, & Lopez-Gayarre, 2013).

Adicionalmente, dado que se puede usar una placa de gran área para transmitir la carga al terreno, el ensayo no presenta problemas de escala y puede usarse para fallar materiales con tamaños de partícula grandes. Como se mencionó en la sección 2.2.2, de acuerdo con la propuesta de Medley (Medley E. , 1994), el tamaño máximo de bloque de los *bims* está en función de la longitud característica. De acuerdo con lo anterior, el tamaño máximo de partícula a ensayar por medio de la prueba *HCT*, está en función del tamaño de las placas y de la robustez del equipo utilizado. Para el presente estudio se utilizó una placa circular de 25 *cm* de diámetro, como se expone en la sección 3.5.1.

Algunos autores, han usado esta prueba para la caracterización de rocas blandas (Lopez-Gayarre, Fernandez-Rodriguez, Gonzalez-Nicieza, & García-Menendez, 2015) y mezclas suelo-roca usadas en presas de tierra (Rodríguez, Nicieza, Gayarre, & Ramos Lopez, 2015).

### 3.5.1 Equipo

El ensayo requiere esencialmente de seis (6) componentes:

- Cilindro hidráulico para aplicar carga al terreno. Para este estudio se utilizó un cilindro tipo hidráulico de doble acción marca ENERPAC, con una capacidad máxima de carga de 1995 *kN*, accionado con una bomba hidráulica manual, de la misma marca.



**Figura 3-10.** Cilindro hidráulico marca ENERPAC para realización de ensayo HCT. Elaboración propia.

- Bomba para accionar el cilindro hidráulico. Para este caso se utilizó una bomba marca ENERPAC, la cual se encuentra dotada de válvulas de control de flujo y presión, que le permiten tener control de la presión aplicada, manteniéndola bajo condiciones estáticas y/o alcanzándola durante momentos de deformación o desplazamiento, dentro de los rangos requeridos. A la bomba se acoplan un par de mangueras de alta presión que transmiten el fluido del cilindro a la bomba y viceversa.



**Figura 3-11.** Bomba y mangueras de alta presión para accionar cilindro hidráulico para realización de ensayo HCT. Elaboración propia.



- Manómetro para medición de presión. Se utilizó un manómetro marca ASHCROFT para medir la presión aplicada al terreno a través del cilindro hidráulico. El manómetro tiene una capacidad de medida máxima de 2.000 *psi* o 140 *bares* y una resolución de 20 *psi* o 2 *bares*. Es importante mencionar que la presión aplicada por el cilindro, no es la misma que la aplicada al terreno, debiendo aplicar un factor de conversión en función del área del émbolo y la placa.



**Figura 3-12.** Manómetro marca ASHCROFT para medir la presión aplicada por la bomba. Elaboración propia.

- Rótula metálica para permitir la rotación de la placa respecto al eje de aplicación de carga y garantizar la perpendicularidad de ésta; de tal forma que sea un esfuerzo principal y no transmita tensiones de corte. La rótula tiene un diámetro de 7,0 *cm* y un espesor de 3,0 *cm*.



**Figura 3-13.** Rótula metálica.  
Elaboración propia.

- Placas de alta resistencia. Una placa sirve de reacción y otra para aplicar la carga al terreno. El elemento de reacción tiene un diámetro de 45,5 *cm*. En cuanto a la placa usada para aplicar la carga, se utilizó un elemento de 25,0 *cm* de diámetro. Ambas placas tienen un espesor de 2,54 *cm* y están elaboradas en acero. Adicional a los elementos de carga y reacción, se utilizaron placas rectangulares para proporcionar una superficie lisa sobre la cual apoyar los extensómetros. El diámetro de la placa fue seleccionado en función del tamaño máximo de bloque que se esperaba encontrar en el material ensayado, siguiendo los postulados mencionados en el numeral 2.2.2.



**Figura 3-14.** Placas en acero para aplicación de carga y reacción.  
Elaboración propia.

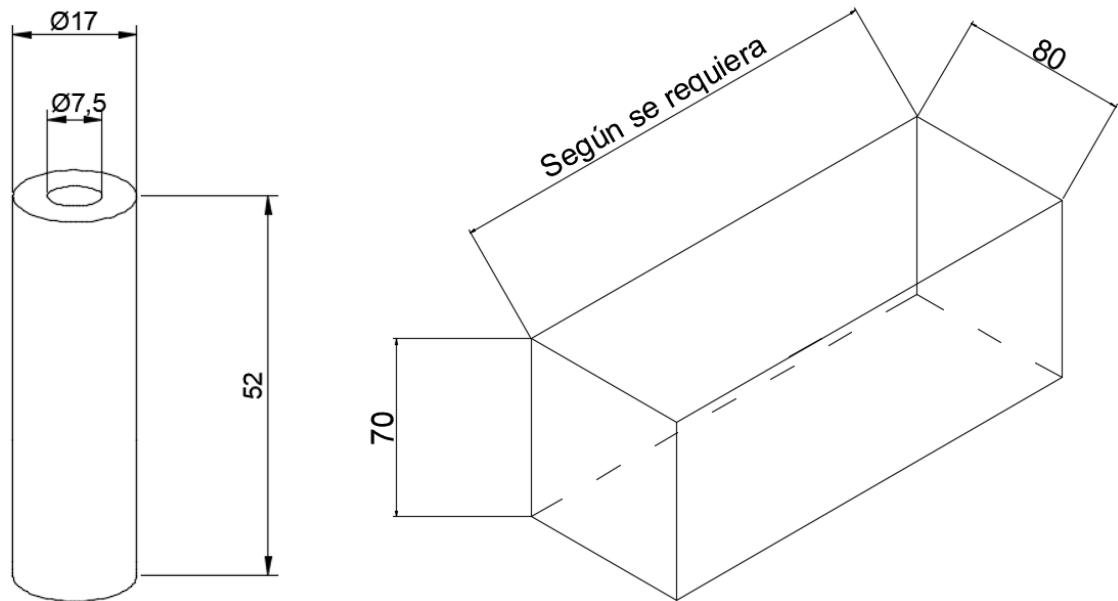
- Extensómetros para medición de desplazamientos. Para el ensayo se utilizaron extensómetros de carátula con una sensibilidad de  $0,01\text{ mm}$  y un recorrido máximo de  $5,0\text{ cm}$ . Con el objeto de poder medir deformaciones mayores, se colocaban varios extensómetros en serie, de tal forma que cuando uno acabara su recorrido, se continuara la adquisición de datos con el otro.



**Figura 3-15.** Extensómetro para medición de desplazamientos.  
Elaboración propia.

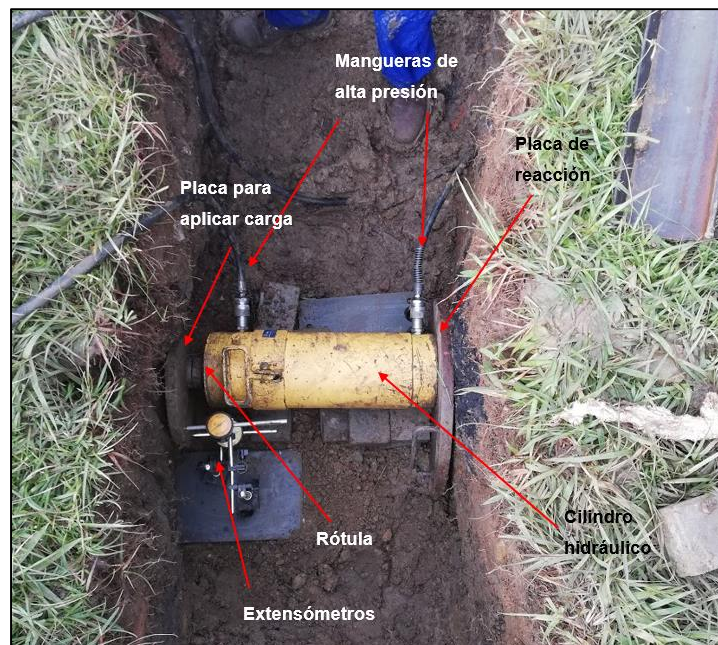
### 3.5.2 Procedimiento

El ensayo requiere inicialmente la excavación de una trinchera de  $0,8\text{ m}$  de ancho,  $0,7\text{ m}$  de profundidad y largo variable, en función del número de ensayos a realizar (Ver Figura 3-16).

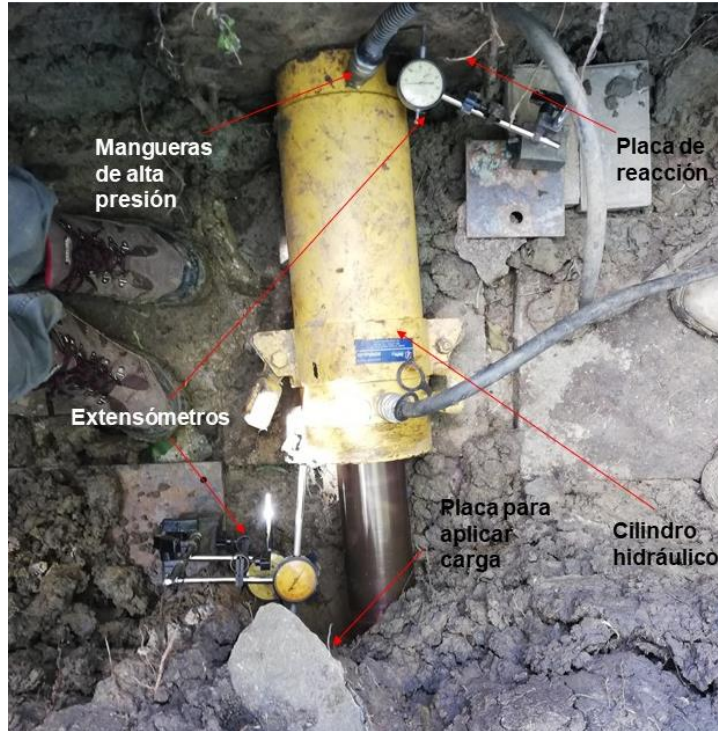


**Figura 3-16.** Esquema y dimensiones del cilindro hidráulico (izquierda) y de la excavación (derecha). Unidades en centímetros. Elaboración propia.

Posteriormente el equipo es posicionado en la trinchera de manera perpendicular a las paredes de la excavación, como se muestra en la Figura 3-17.







**Figura 3-17.** Posicionamiento del cilindro en la trinchera y montaje para realización de ensayo HCT.  
Elaboración propia.

Una vez el cilindro es posicionado, se coloca una placa en la base del cilindro, la cual actúa como reacción. En el otro extremo, sobre el pistón, se acopla un sistema de rótula y placa, de tal forma que la transferencia de carga se dé y en dirección ortogonal al terreno (Ver Figura 3-17). Con los elementos en posición, se acopla el cilindro a la bomba a través de mangueras de alta presión, por medio de las cuales se transfiere el fluido de la bomba al cilindro para poner en movimiento el pistón, hasta que este sistema esté en contacto con el terreno.

Luego se colocan los extensómetros para la medición de desplazamientos. Se ubicó un extensómetro en la placa de reacción; y una pareja de extensómetros en la placa donde se aplica la carga al terreno; de tal forma que se pudiese tener varias lecturas redundantes en diferentes partes. Dada la limitación de espacio, solo fue posible ubicar los extensómetros en uno de los lados de la placa, conforme se observa en la Figura 3-17.

Finalmente, se aplica gradualmente presión sobre el terreno y se miden los desplazamientos generados. Se aplicó la carga buscando una rata de desplazamiento de



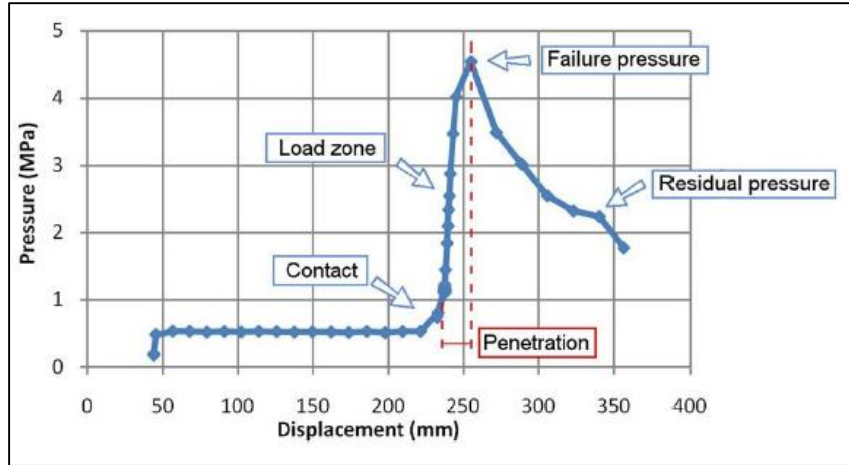
1,0 *mm/min*; por lo que el ensayo es de deformación controlada. La presión continúa incrementando hasta que se genere la falla del material ensayado, ante lo cual el esfuerzo aplicado cae rápidamente, mientras el pistón penetra el terreno; lo cual marca el fin del ensayo. En caso de que la falla descrita anteriormente no se alcanzase, se tuvo como criterio adicional de parada un desplazamiento mínimo de 60,0 *mm*.

### 3.5.3 Obtención de parámetros de resistencia al corte

Los datos recopilados durante la prueba permiten la construcción de la curva esfuerzo-desplazamiento del terreno. Ésta puede ser utilizada para estimar la resistencia pico y residual del material ensayado. De las curvas, se pueden identificar cuatro (4) fases del ensayo (Ver Figura 3-18): Una primera fase o zona horizontal, que corresponde al recorrido del pistón hasta que el cilindro entra en contacto con las paredes de la trinchera (acoplamiento sistema cilindro-trinchera), punto a partir del cual inicia la aplicación de carga al terreno, lo que constituye la segunda fase.

A continuación del contacto, se presenta una zona ascendente inclinada de la curva, la cual representa la etapa en la que el cilindro hidráulico está ejerciendo presión sobre las paredes de la trinchera (en esta zona el material se comporta elásticamente). Esta parte también constituye la segunda fase, hasta el momento en el cual se presenta la resistencia pico o falla, es decir, la tercera fase. Finalmente se encuentra la cuarta fase, la cual corresponde a la resistencia residual (Rodríguez, Nicieza, Gayarre, & Ramos Lopez, 2015).

Adicionalmente, a partir del esfuerzo de falla, considerando las dimensiones de la trinchera y la profundidad a la cual se realizó el ensayo, es posible calcular la cohesión  $c$  y el ángulo de fricción interna  $\phi$  del terreno, de acuerdo a las fórmulas clásicas para el cálculo de la capacidad portante (Terzaghi, 1956), (Meyerhof, 1961), (Meyerhof, 1963), (Brinch Hansen), apud (González-Nicieza, Prendes-Gero, Fernandez-Rodriguez, & Lopez-Gayarre, 2013)).



**Figura 3-18.** Etapas del ensayo HCT.

Tomado de (Rodríguez, Nicieza, Gayarre, & Ramos Lopez, 2015).

Otro método para el cálculo de parámetros de resistencia y rigidez del terreno, es la aplicación de técnicas de retro-análisis, asumiendo una falla frágil (se observa un pico en la curva esfuerzo-desplazamiento) o una falla dúctil (no se observa un pico), según se evidencia de los datos recolectados. Para ello se pueden implementar modelos 2D o 3D para representar las condiciones geométricas del ensayo (dimensiones y profundidad de la trinchera y posición de los equipos dentro de ella) y la estratigrafía (posición e inclinación de los estratos) (Rodríguez, Nicieza, Gayarre, & Ramos Lopez, 2015).

Después de ingresar la geometría de la excavación donde se ejecutó la prueba, se asumen unos valores semilla o datos iniciales de cohesión  $c$  y fricción  $\varphi$  al modelo, al igual que módulos de deformación del suelo. Estos parámetros son requeridos para analizar el comportamiento del terreno haciendo uso del criterio de Mohr-Coulomb. El efecto del recorrido del pistón y la carga aplicada es simulado en el terreno, obteniendo una curva esfuerzo-deformación del programa (Rodríguez, Nicieza, Gayarre, & Ramos Lopez, 2015).

La curva teórica es comparada con la real, obtenida del ensayo; hasta que, a través de un proceso iterativo donde se varían los parámetros de resistencia y módulos de deformación, se obtenga una curva similar a la real (Ver Figura 3-19). Si la resistencia pico de la curva de calibración es mayor a la medida en campo, los parámetros de resistencia asumidos son mayores a los reales, por lo que se deben disminuir en la siguiente iteración, y viceversa. Cuando la curva arrojada por el programa y la curva obtenida en campo sean similares, se concluye que los parámetros ingresados al programa son iguales a los del

sitio estudiado. Es importante considerar que esta solución no es única ( $c$  y  $\varphi$ ), por lo que debe haber un conocimiento previo de las condiciones geotécnicas del material, el cual permita tener una mayor confiabilidad en los resultados obtenidos.

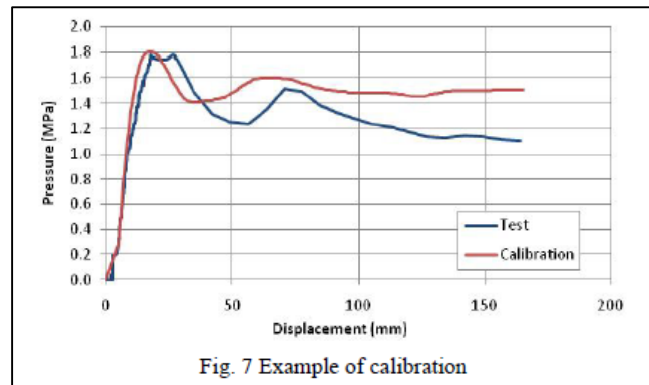


Fig. 7 Example of calibration

**Figura 3-19.** Ejemplo de calibración de curvas esfuerzo-desplazamiento. Tomado de (Rodríguez, Nicieza, Gayarre, & Ramos López, 2015).

## Capítulo 4

### 4. Resultados

En este capítulo se resumen los resultados obtenidos de los análisis realizados, tanto de los datos recopilados (Ver secciones 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4), como de las pruebas ejecutadas en campo (Ver sección 4.8); y las correlaciones propuestas (Ver secciones 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8). Como se explicó en el capítulo anterior, el procedimiento seguido inicialmente consistió en la construcción de una robusta base de datos que permitiese obtener información del comportamiento geomecánico de mezclas de suelo y roca, y se pudiese relacionar con parámetros físicos como la forma de los bloques, la gradación o la proporción volumétrica de bloques. Estos resultados fueron validados con pruebas in-situ HCT.

#### 4.1 Materiales estudiados

Debido a la gran cantidad de datos recopilados, los materiales investigados en este trabajo poseen un amplio origen y variedad de características. Entre ellos, se encuentra material de origen aluvial y materiales provenientes de cantera o producto de excavaciones en roca usando equipo mecánico o voladura. Las características de los mismos se presenta en la sección 4.1.1.

Adicionalmente, se ejecutaron ensayos in-situ sobre un depósito de vertiente y un lleno antrópico, conformado con bloques, que, por su forma y características del sitio, pueden tener un origen aluvial y de cantera o depósitos de vertiente. De estos materiales se habla con mayor detalle en la sección 4.8.

#### 4.1.1 Características de los materiales

Como se mencionó en la sección 4.1, los materiales que conforman la base de datos estudiados en la presente investigación poseen diversos orígenes, tamaños y geometrías. El tamaño máximo de partícula entre 2 mm y 180 mm, variando la forma de bloques (redondeado, subredondeado, subangular y angular).

En cuanto al origen, los materiales tienen predominantemente un origen aluvial o fueron reconfigurados a partir de material extraído de cantera, y las excavaciones fueron realizadas con equipo mecánico o voladura. La litología de los bloques incluye todos los tipos de roca (sedimentarias, metamórficas e ígneas). En la Tabla 4-1 se presenta un resumen de la geometría y características de los materiales estudiados.

**Tabla 4-1.** Características de los materiales estudiados.

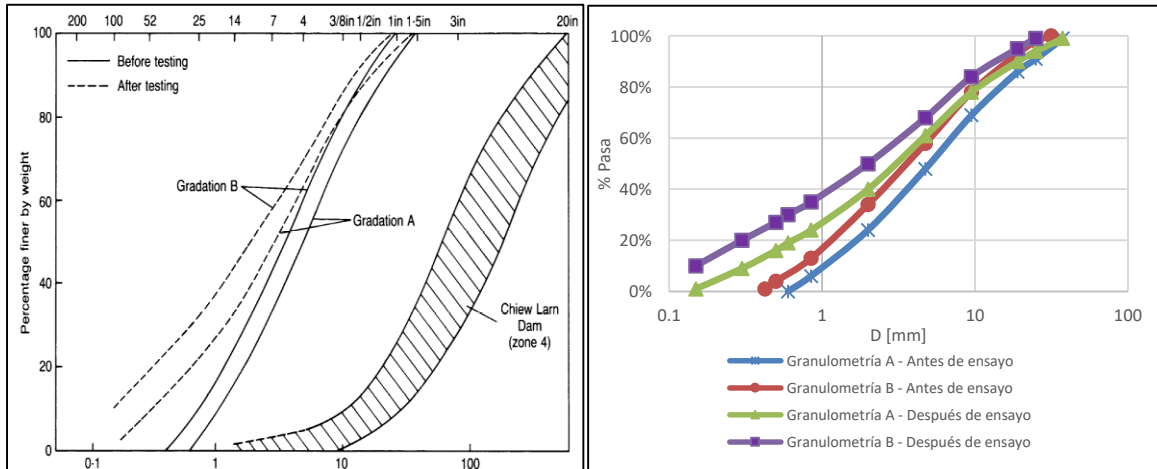
Código de la fuente	Código granulo metría	Tamaño máximo de partícula (mm)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Origen bloques (litología)	Forma bloques
1	1.1.	38.1	18.5	Gravuaca (roca sedimentaria)	Desconocida
	1.2.	25.4	18.5	Gravuaca (roca sedimentaria)	Desconocida
2	2.1.	50.8	16.8	Cantera (Andesita)	Subangular
	2.2.	50.8	16.8	Cantera (Andesita)	Subangular
	2.3	50.8	16.8	Aluvial (Dolomita)	Subredondeado
	2.4	50.8	16.8	Aluvial (Dolomita)	Subredondeado
3	3.1.	80	87% de $\gamma$ d	Desconocido	Desconocida
	3.2	25	87% de $\gamma$ d	Desconocido	Desconocida
4	4.1	50.8	22	Voladura (Metamórfico)	Angular
	4.2	50.8	22	Voladura (Metamórfico)	Angular
	4.3	50.8	22	Aluvial (Metamórfico)	Subredondeado
	4.4	50.8	22	Aluvial (Metamórfico)	Subredondeado
5	5.1	4.75	19	Aluvial (Gneiss, granito y esquistos)	Redondeado a subredondeado

Código de la fuente	Código granulometría	Tamaño máximo de partícula (mm)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Origen bloques (litología)	Forma bloques
	5.2	4.75	19	Aluvial (Gneiss, granito y esquistos)	Redondeado a subredondeado
	5.3	76.2	20	Aluvial (Gneiss, granito y esquistos)	Redondeado a subredondeado
	5.4	76.2	21	Aluvial (Gneiss, granito y esquistos)	Redondeado a subredondeado
	5.5	76.2	22	Aluvial (Gneiss, granito y esquistos)	Redondeado a subredondeado
6	6.1	4.75	16	Aluvial (Gneiss, granito y esquistos)	Redondeado a subredondeado
	6.2	76.2	18	Aluvial (Gneiss, granito y esquistos)	Redondeado a subredondeado
	6.3	76.2	18	Aluvial (Gneiss, granito y esquistos)	Redondeado a subredondeado
	6.4	76.2	19	Aluvial (Gneiss, granito y esquistos)	Redondeado a subredondeado
	6.5	76.2	20	Aluvial (Gneiss, granito y esquistos)	Redondeado a subredondeado
7	7.1	76.2	20	Aluvial río Medellín	Redondeado a subredondeado
	7.2	19.05	20	Aluvial río Medellín	Redondeado a subredondeado
	7.3	4.76	20	Aluvial río Medellín	Redondeado a subredondeado
	7.4	2	20	Aluvial río Medellín	Redondeado a subredondeado
	7.5	76.2	20	Aluvial río Medellín	Redondeado a subredondeado
	7.6	76.2	20	Aluvial río Medellín	Redondeado a subredondeado
	7.7	76.2	20	Aluvial río Medellín	Redondeado a subredondeado
8	8.1	63.5	24-26	Voladura (Metamórfico)	Angular
	8.2	63.5	24-26	Voladura (Metamórfico)	Angular
	8.3	63.5	20-25	Voladura (Metamórfico)	Angular
	8.4	63.5	20-25	Voladura (Metamórfico)	Angular
9	9.1	80	Desconocido	Cantera (Basalto)	Angular
	9.2	180	Desconocido	Aluvial	Redondeado
	9.3	180	Desconocido	Cantera (Conglomerado)	Subangular
	9.4	180	Desconocido	Cantera (Conglomerado)	Angular
	9.5	180	Desconocido	Basalto triturado	Angular
	9.6	180	Desconocido	Cantera (Gneiss)	Subangular
	9.7	180	Desconocido	Cantera (Gneiss)	Angular

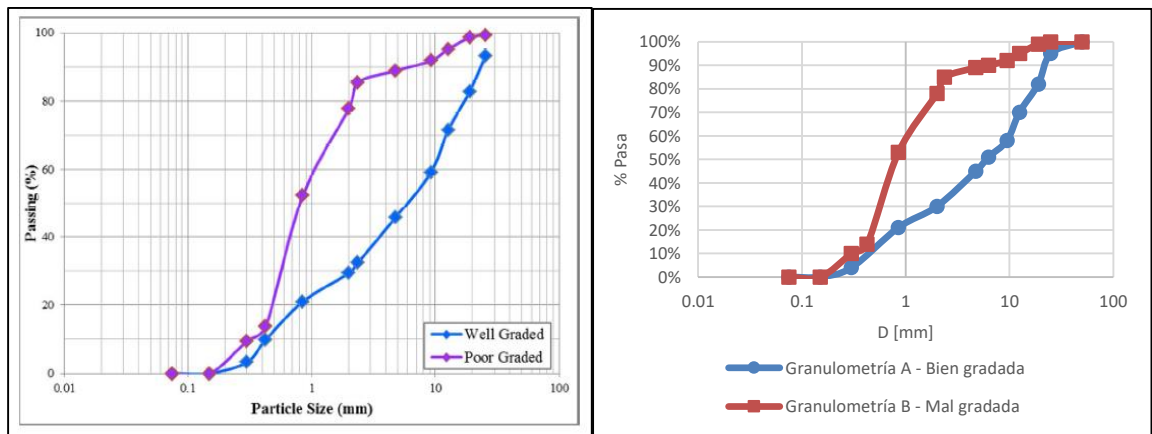
Elaboración propia

### 4.1.2 Granulometría

De los párrafos anteriores, se evidencia la base de datos conformada varía en un amplio rango de tamaños. Debido a que uno de los objetivos de esta investigación es relacionar propiedades físicas con parámetros de resistencia, la granulometría es uno de los insumos más importantes.

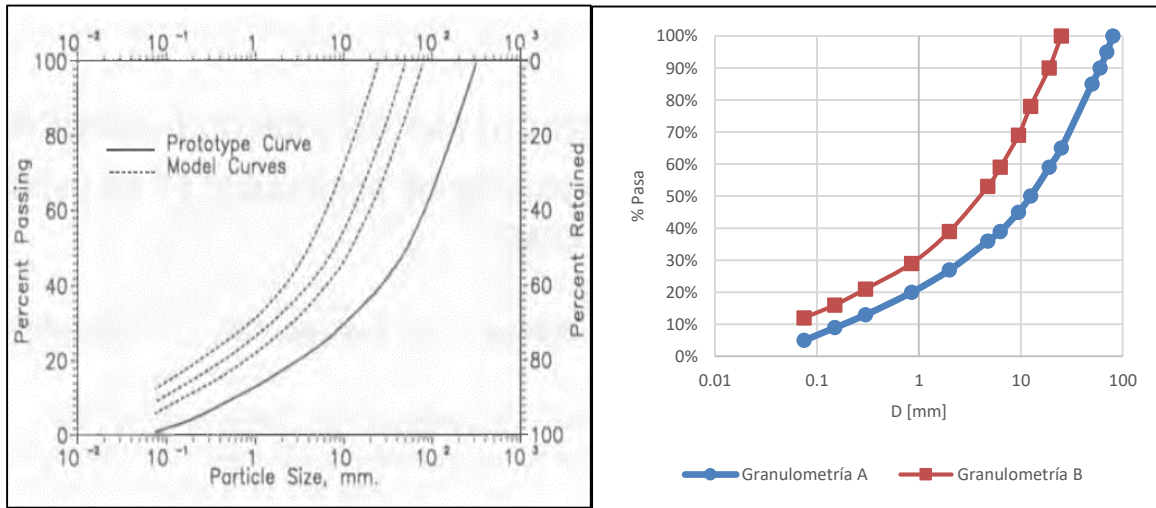


**Figura 4-1.** Digitalización granulometría del material 1.1 (Granulometría A) y 1.2 (Granulometría B) – Curva original (izquierda) y digitalizada (derecha). Elaboración propia a partir de (Indraratna, Wijewardena, & Balasubramaniam, 1993).

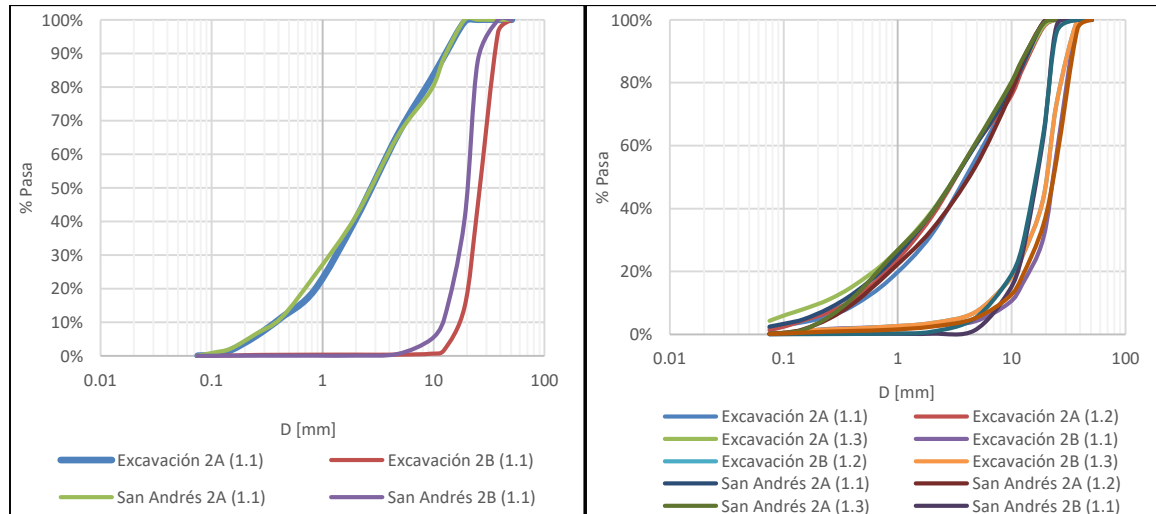


**Figura 4-2.** Digitalización granulometría del material 2.1 y 2.3 (Granulometría A) y 2.2 y 2.4 (Granulometría B) – Curva original (izquierda) y digitalizada (derecha). Elaboración propia a partir de (AtashBahar, Jamshidi chenari, & Lashtenashaie, 2015).

Para obtener la granulometría de los materiales estudiados, en algunos casos, se recurrió a la digitalización de las curvas presentadas en la literatura. En otros casos, la información fue obtenida a partir de ensayos de laboratorio y facilitada por las empresas y entidades propietarias de la información, es decir, Empresas Públicas de Medellín E.S.P. (EPM). A continuación, se presentan las granulometrías por fuente de material.

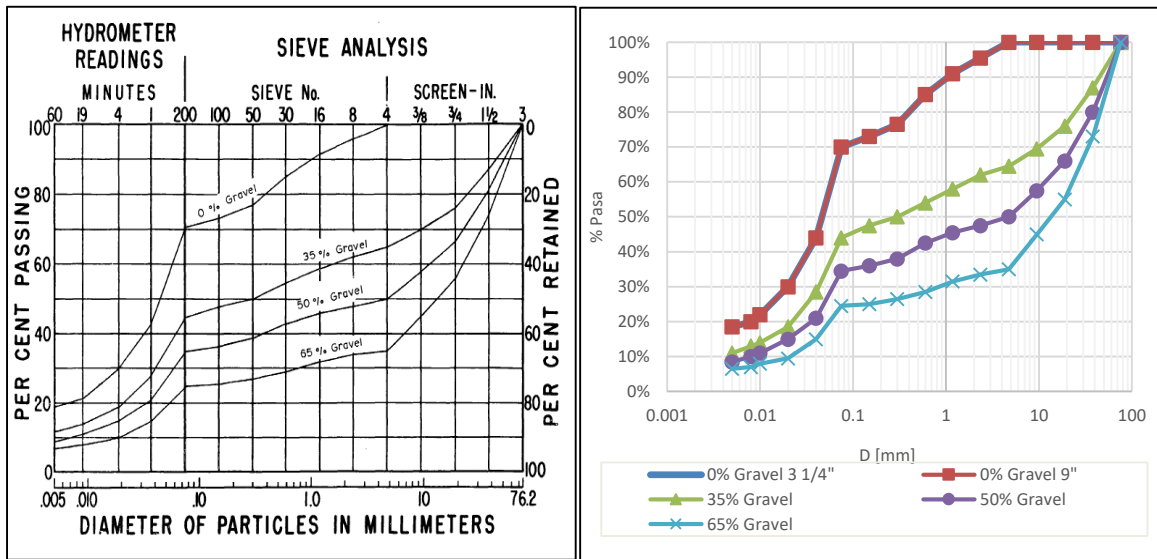


**Figura 4-3.** Digitalización granulometría del material 3.1 (Granulometría A) y 3.2 (Granulometría B) – Curva original (izquierda) y digitalizada (derecha). Elaboración propia a partir de (Sharma, Venkatachalam, & Roy, 1994).

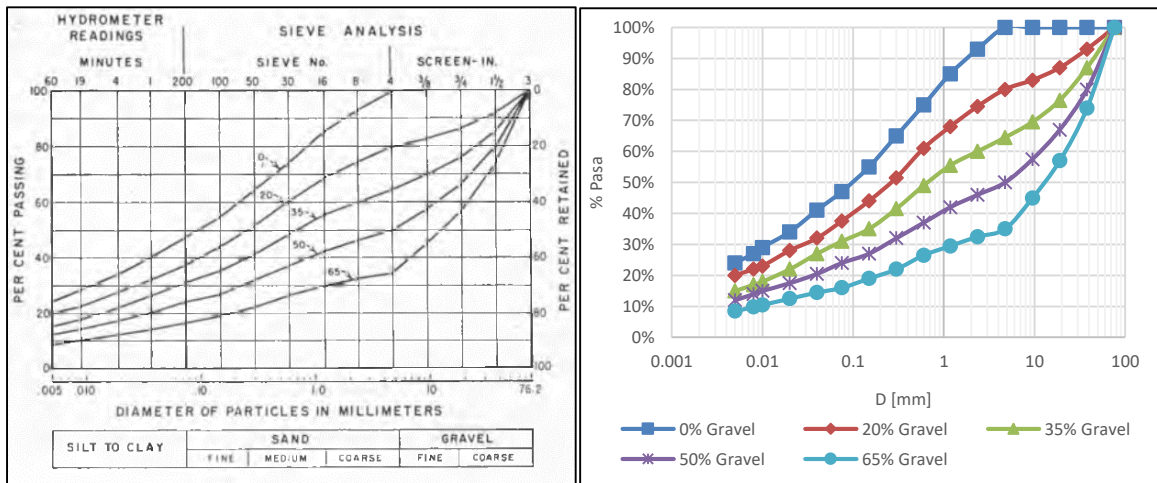


**Figura 4-4.** Granulometría del material 4.1 (Granulometría Excavación 2A), 4.2 (Granulometría Excavación 2B), 4.3 (Granulometría San Andrés 2A) y 4.4 (Granulometría San Andrés 2B) – Curvas antes (izquierda) y después (derecha) de ensayo. Elaboración propia a partir de información suministrada por EPM.

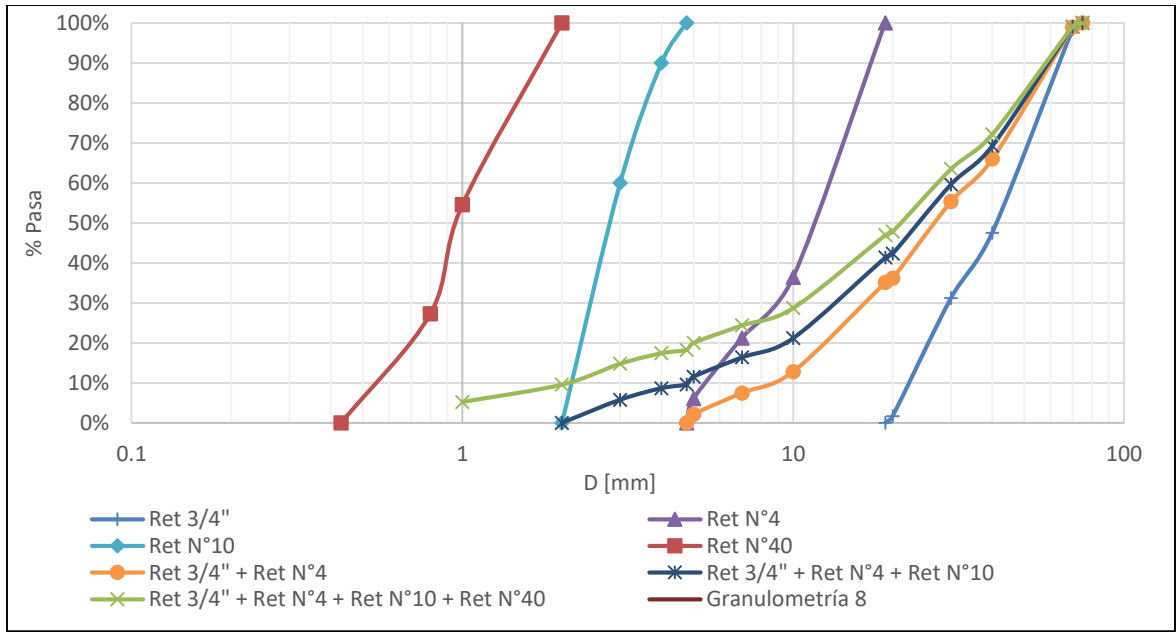




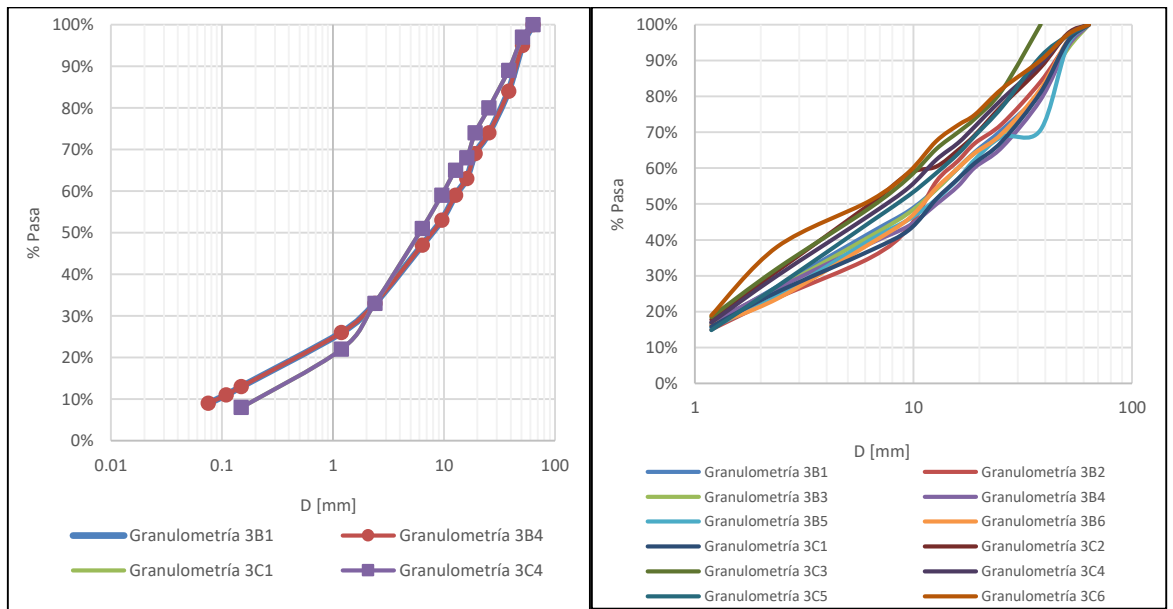
**Figura 4-5.** Granulometría del material 5.1 (0% Gravel 3 1/4”), 5.2 (0% Gravel 9”), 5.3 (35% Gravel), 5.4 (50% Gravel) y 5.5 (65% Gravel) – Curvas original (izquierda) y digitalizada (derecha).  
Elaboración propia a partir de (US Bureau of Reclamation, 1966).



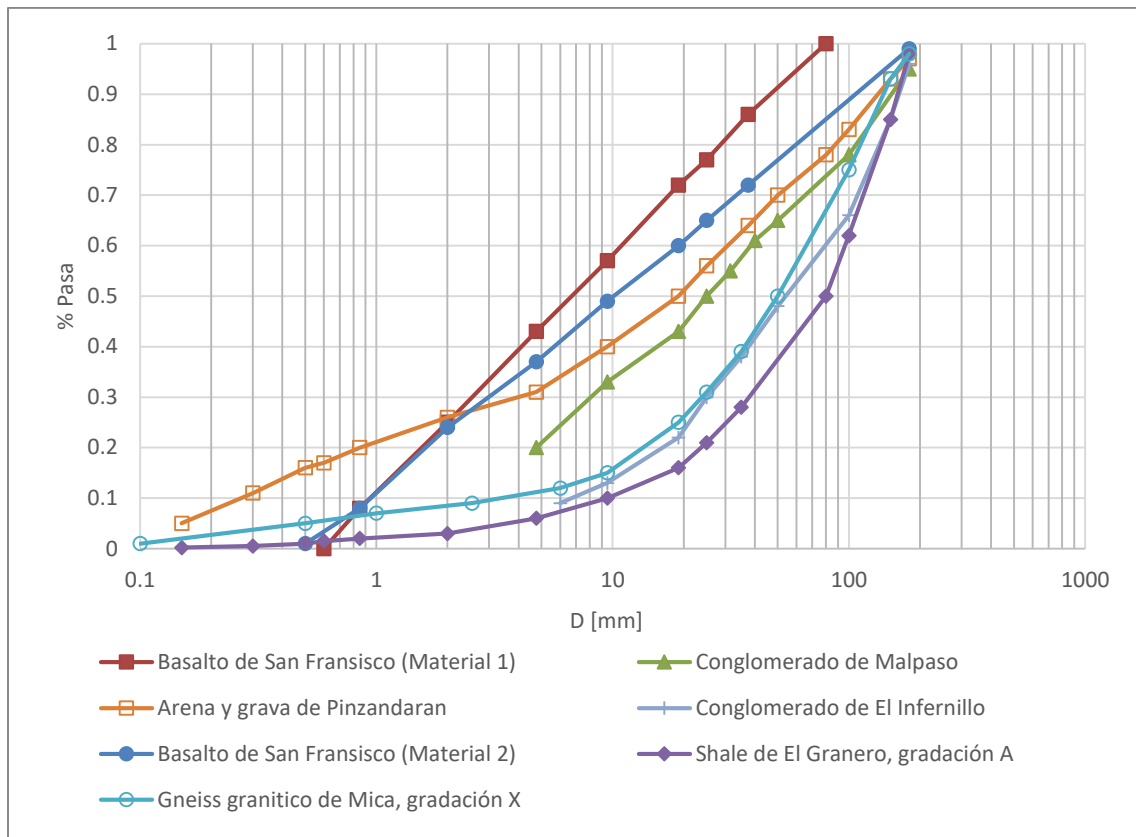
**Figura 4-6.** Granulometría del material 6.1 (0% Gravel), 6.2 (20% Gravel), 6.3 (35% Gravel), 6.4 (50% Gravel) y 6.5 (65% Gravel) – Curvas original (izquierda) y digitalizada (derecha).  
Elaboración propia a partir de (Holtz & Ellis, 1961).



**Figura 4-7.** Granulometría del material 7.1 (Ret 3/4"), 7.2 (Ret N°4), 7.3 (Ret N°10), 7.4 (Ret N°40), 7.5 (Ret 3/4" + Ret N°4), 7.6 (Ret 3/4" + Ret N°4 + Ret N°10), 7.7 (Ret 3/4" + Ret N°4 + Ret N°10 + Ret N°40) – Curvas original (izquierda) y digitalizada (derecha). Elaboración propia a partir de (Nanclares, 2018).

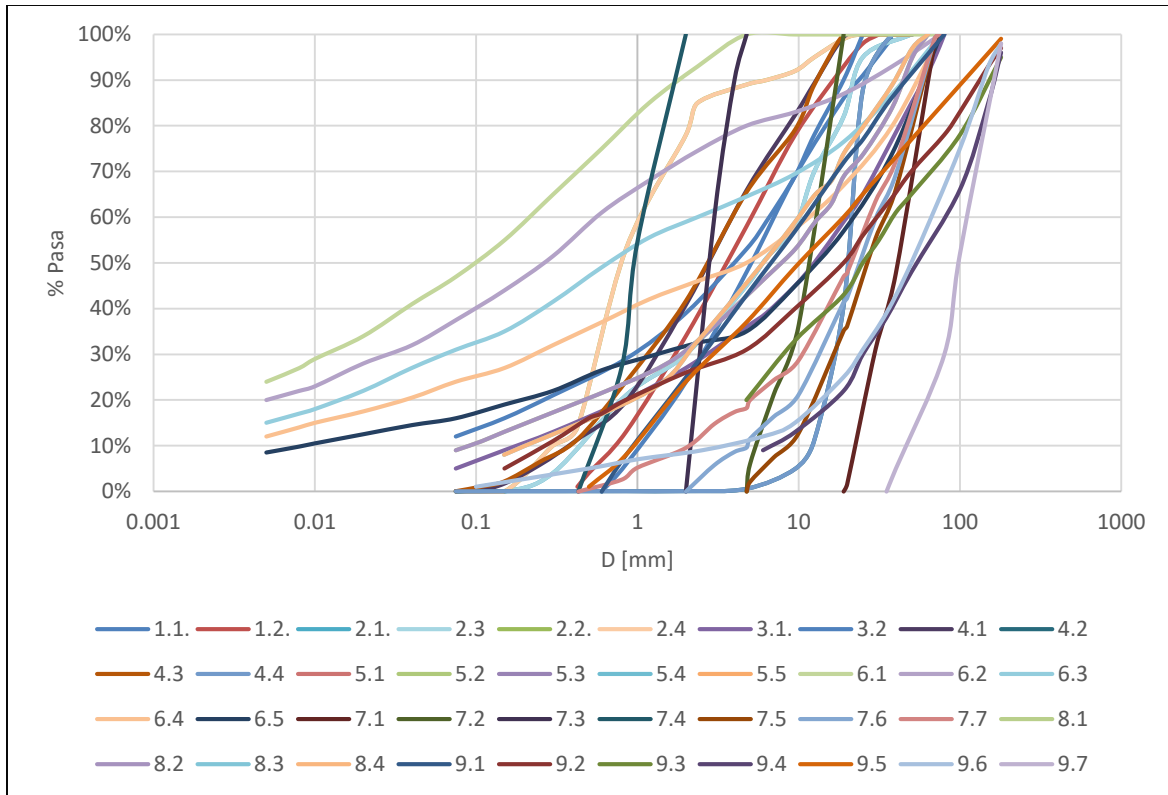


**Figura 4-8.** Granulometría del material 8.1 (Granulometría 3B1), 8.2 (Granulometría 3B4), 8.3 (Granulometría 3C1) y 8.4 (Granulometría 3C4) – Curvas antes (izquierda) y después (derecha) de ensayo. Elaboración propia a partir de información suministrada por EPM.



**Figura 4-9.** Granulometría del material 9.1 (Basalto de San Francisco (Material 1)), 9.2 (Arena y grava de Pinzandaran), 9.3 (Conglomerado de Malpaso), 9.4 (Conglomerado de El Infernillo), 9.5 (Basalto de San Francisco (Material 2)), 9.6 (Gneis granítico de Mica, gradación X), 9.7 (Gneis granítico de Mica, gradación Y). Elaboración propia a partir de (Marsal, 1967).

Para tener una idea de la variabilidad de los materiales estudiados, se compilaron todas las granulometrías en una sola gráfica, la cual se presenta a continuación (Ver Figura 4-10). De la figura se observa que hay materiales que engloban un amplio rango de tamaños (bien gradados), mientras que otros se encuentran conformados por un estrecho intervalo (mal gradados). Adicionalmente, se puede evidenciar gráficamente el tamaño máximo de las partículas, el cual como ya se mencionó, varía entre 2 mm y 180 mm.



**Figura 4-10.** Compilación de las curvas granulométricas de todos los materiales recopilados. Elaboración propia.

## 4.2 Determinación del límite entre matriz y bloque

La determinación del límite que separa la matriz de los bloques es uno de los pasos más importantes de la investigación, debido a que este límite permite encontrar la proporción volumétrica de bloques *VBP* de cada material. Este parámetro, como se pudo evidenciar en los antecedentes presentados en el capítulo 2.2.4, es uno de los que mayor efecto tiene en la resistencia al corte.

En este trabajo investigativo se llevará a cabo una comparación entre dos metodologías para obtener el límite entre matriz y bloque. La primera fue propuesta por (Medley E. , 1994) y la segunda por (Nanclares, 2018). El procedimiento y sustento teórico de ambas metodologías se presentó con detalle en la sección 2.2.2.

### 4.2.1 Límite matriz bloque usando la metodología de (Medley E. , 1994).

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del límite entre matriz y bloque para los diferentes materiales estudiados haciendo uso de esta metodología.

**Tabla 4-2.** Límite matriz bloque para los materiales estudiados usando la metodología de (Medley E. , 1994).

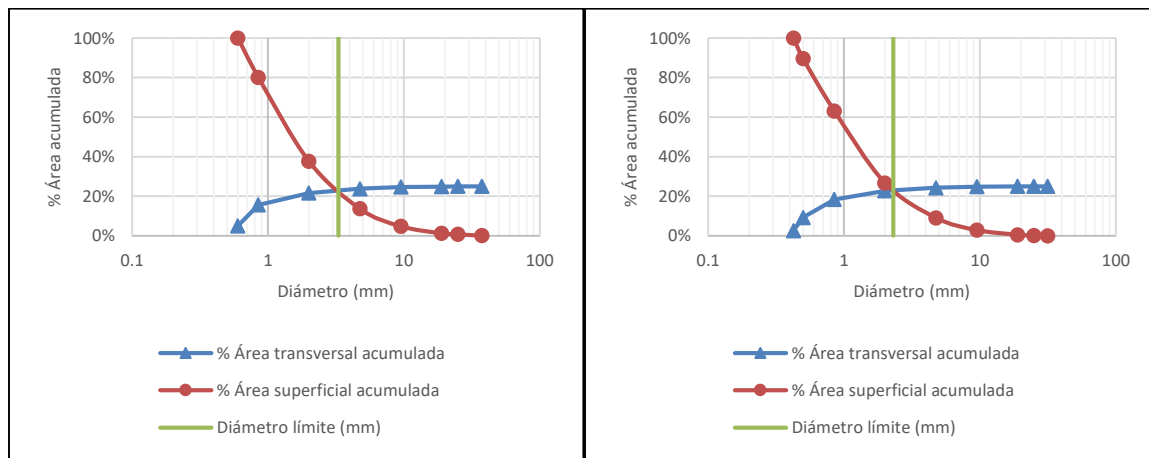
Código granulometría	Lc (m)	Límite matriz bloque (m)	Tamaño máximo bloque (m)
1.1.	0.3	0.015	0.225
1.2.	0.3	0.015	0.225
2.1.	0.153	0.008	0.115
2.2.	0.153	0.008	0.115
2.3	0.153	0.008	0.115
2.4	0.153	0.008	0.115
3.1.	0.381	0.019	0.286
3.2	0.381	0.019	0.286
4.1	0.3	0.015	0.225
4.2	0.3	0.015	0.225
4.3	0.3	0.015	0.225
4.4	0.3	0.015	0.225
5.1	0.083	0.004	0.062
5.2	0.229	0.011	0.171
5.3	0.229	0.011	0.171
5.4	0.229	0.011	0.171
5.5	0.229	0.011	0.171
6.1	0.229	0.011	0.171
6.2	0.229	0.011	0.171
6.3	0.229	0.011	0.171
6.4	0.229	0.011	0.171
6.5	0.229	0.011	0.171
7.1	0.3	0.015	0.225
7.2	0.3	0.015	0.225
7.3	0.3	0.015	0.225
7.4	0.3	0.015	0.225
7.5	0.3	0.015	0.225
7.6	0.3	0.015	0.225
7.7	0.3	0.015	0.225
8.1	0.3	0.015	0.225
8.2	0.3	0.015	0.225
8.3	0.3	0.015	0.225

Código granulometría	Lc (m)	Límite matriz bloque (m)	Tamaño máximo bloque (m)
8.4	0.3	0.015	0.225
9.1	1.13	0.057	0.848
9.2	1.13	0.057	0.848
9.3	1.13	0.057	0.848
9.4	1.13	0.057	0.848
9.5	1.13	0.057	0.848
9.6	1.13	0.057	0.848
9.7	1.13	0.057	0.848

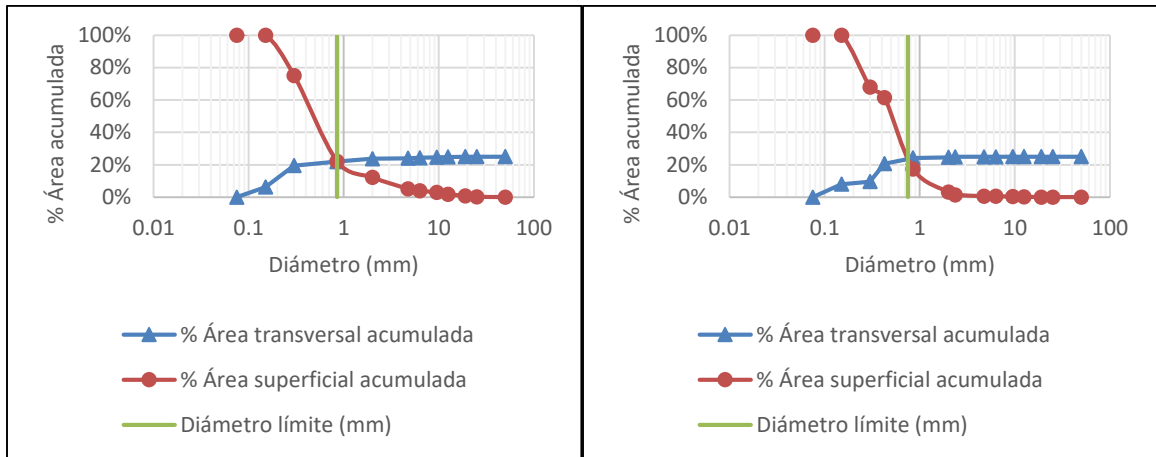
Elaboración propia.

#### 4.2.2 Límite matriz bloque usando la metodología de (Nanclares, 2018)

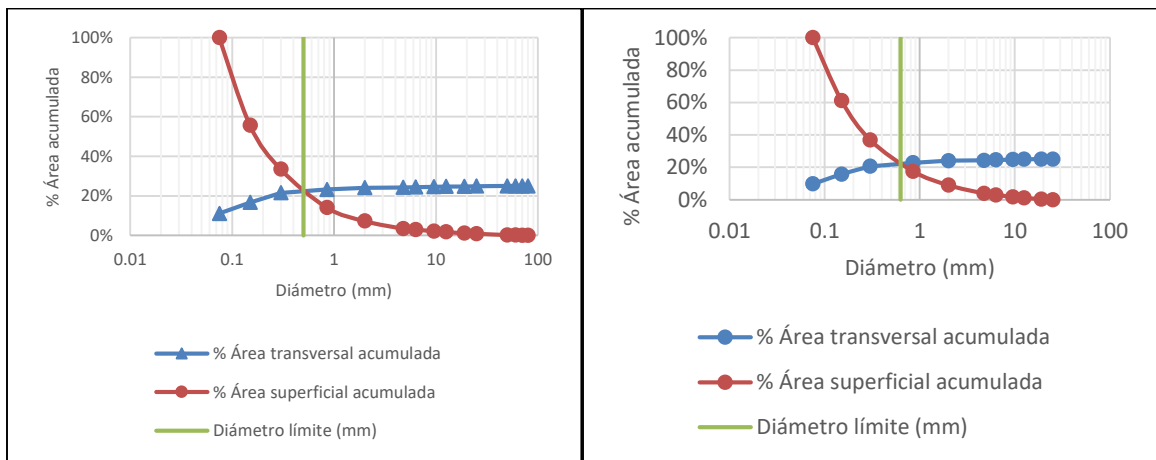
A continuación, se presentan los resultados obtenidos del límite entre matriz y bloque para los diferentes materiales estudiados haciendo uso de esta metodología.



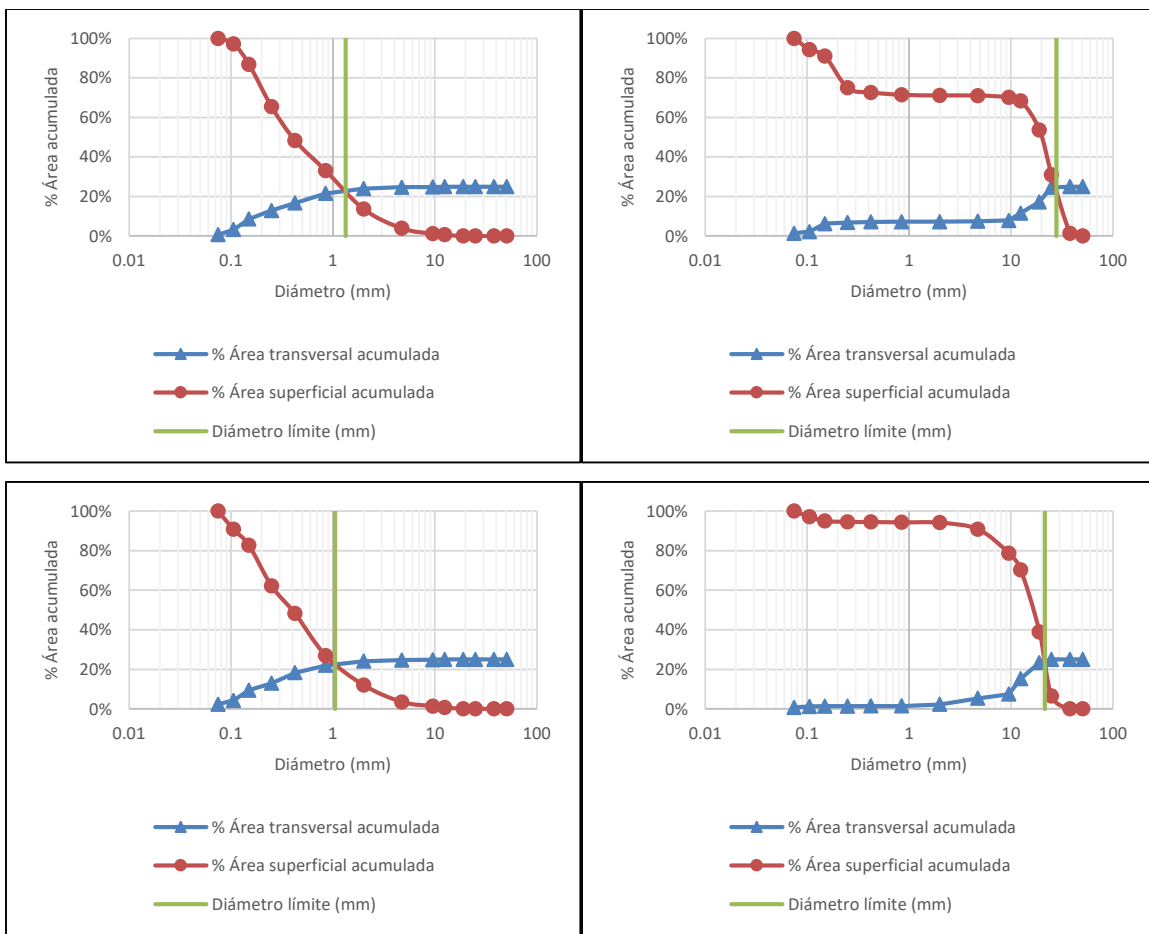
**Figura 4-11.** Resultados límite matriz bloque para material 1.1 (izquierda) y 1.2 (derecha) usando la metodología de (Nanclares, 2018).  
Elaboración propia.



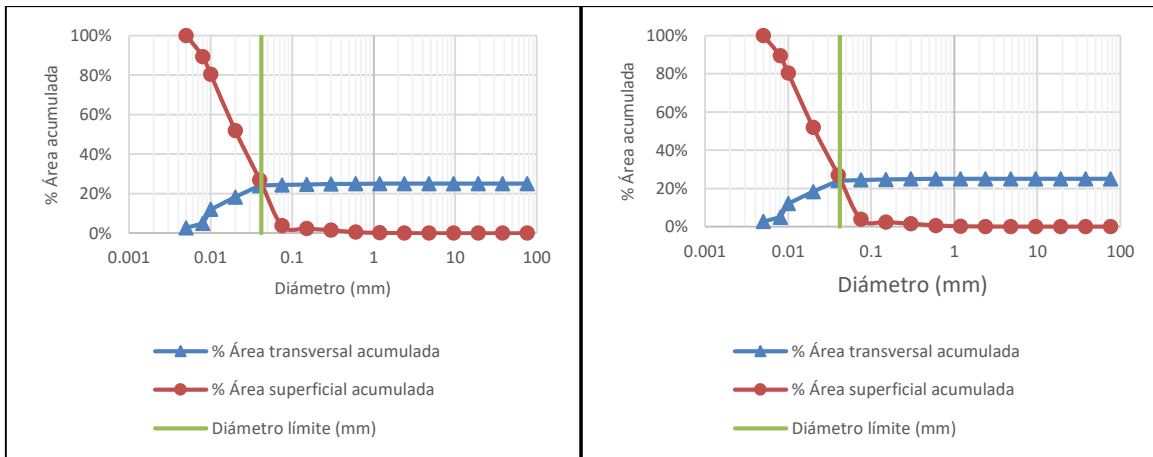
**Figura 4-12.** Resultados límite matriz bloque para material 2.1 y 2.3 (izquierda) y 2.2 y 2.4 (derecha) usando la metodología de (Nanclares, 2018). Elaboración propia.



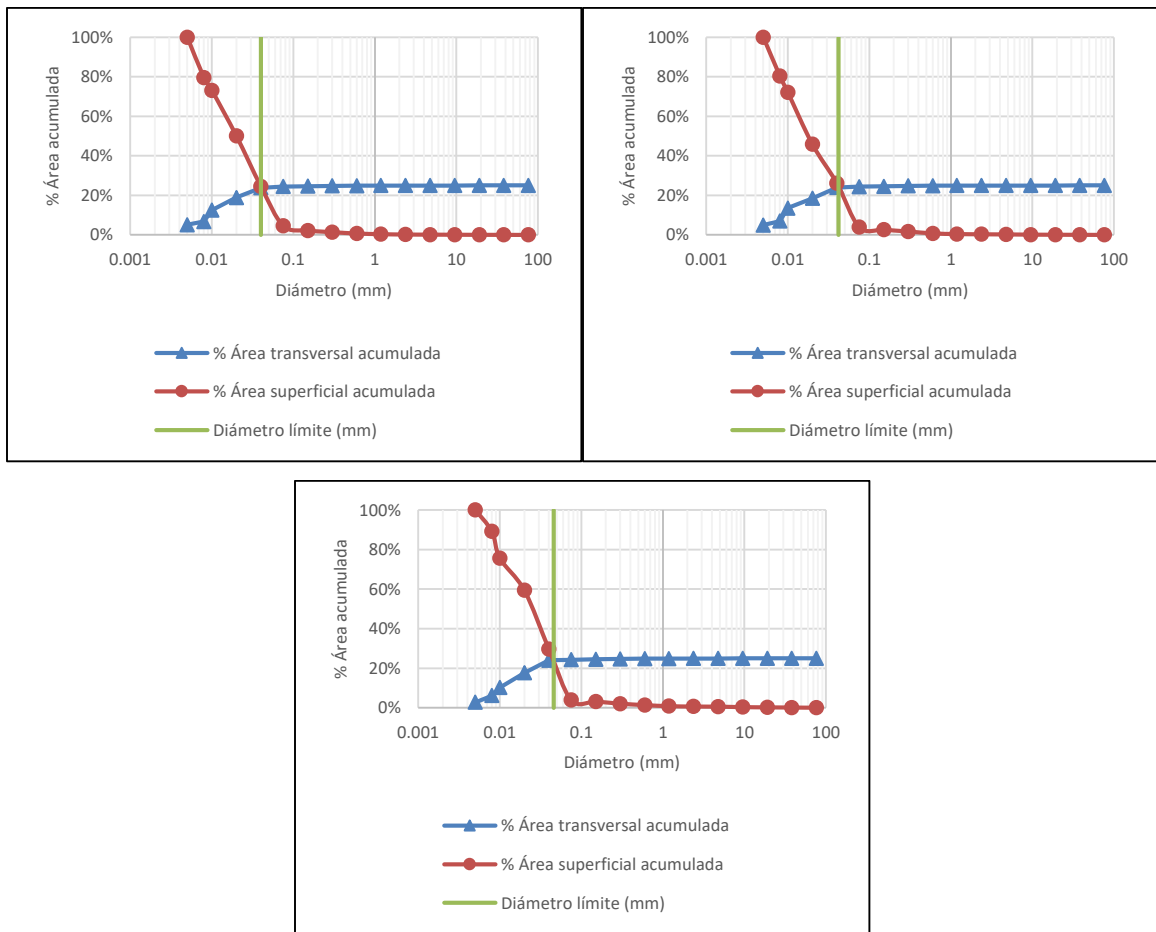
**Figura 4-13.** Resultados límite matriz bloque para material 3.1 (izquierda) y 3.2 (derecha) usando la metodología de (Nanclares, 2018). Elaboración propia.



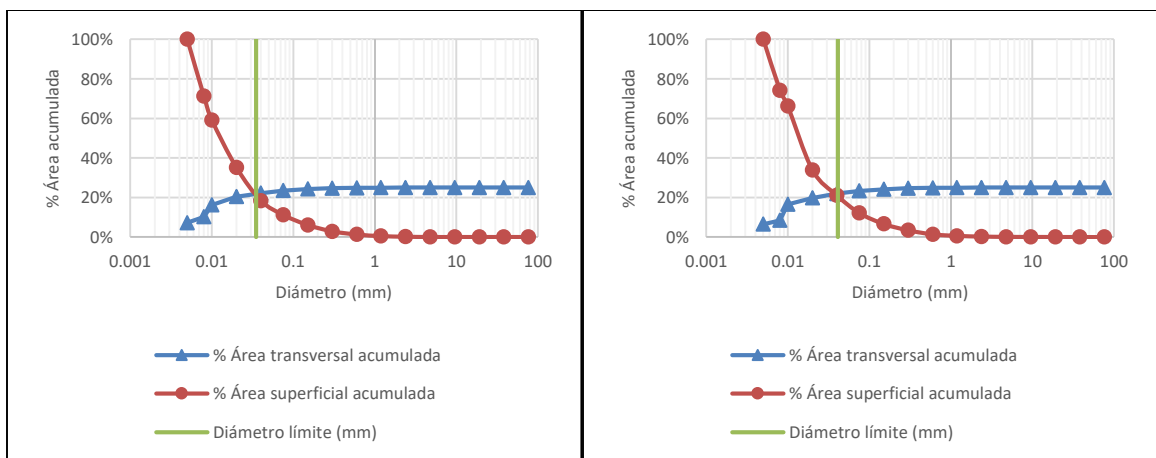
**Figura 4-14.** Resultados límite matriz bloque para material 4.1 (superior izquierda), 4.2 (superior derecha), 4.3 (inferior izquierda) y 4.4 (inferior derecha) usando la metodología de (Nanclares, 2018).  
Elaboración propia.

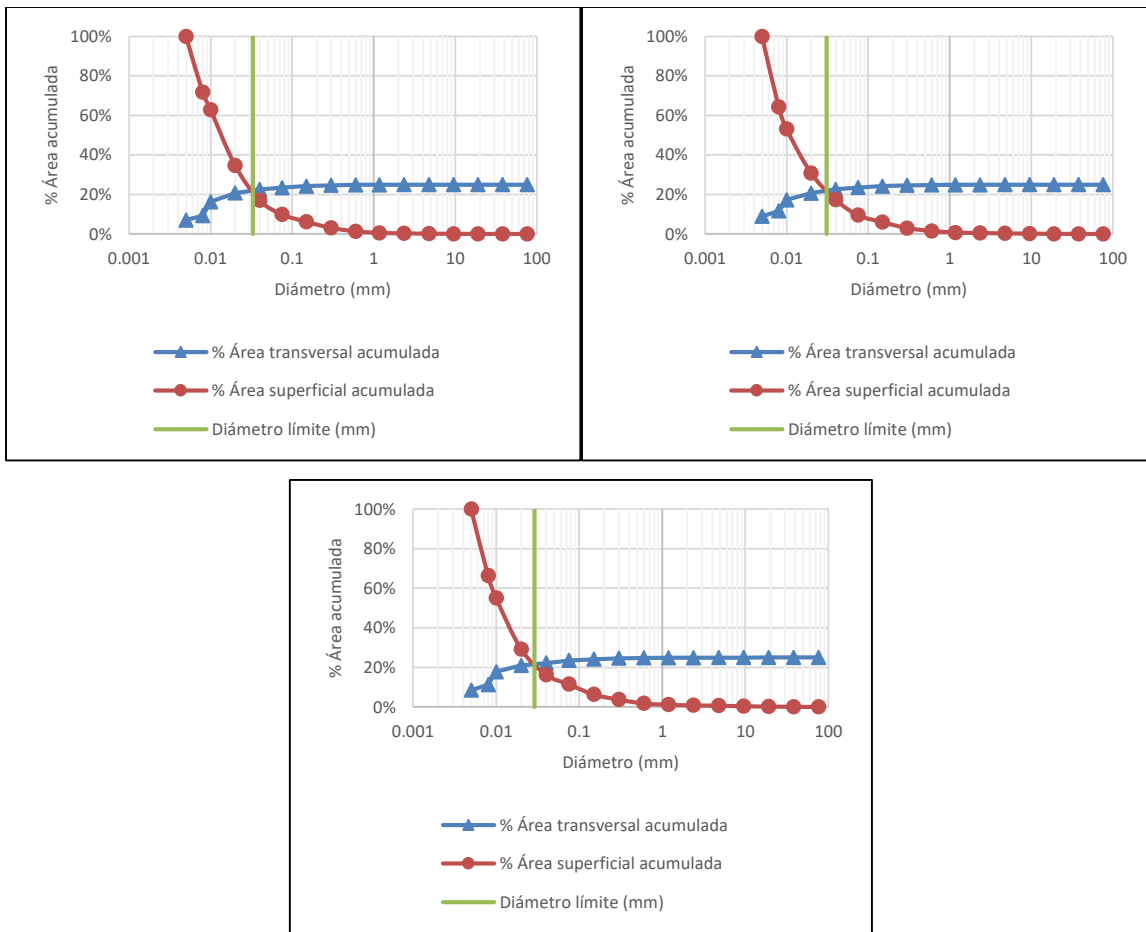




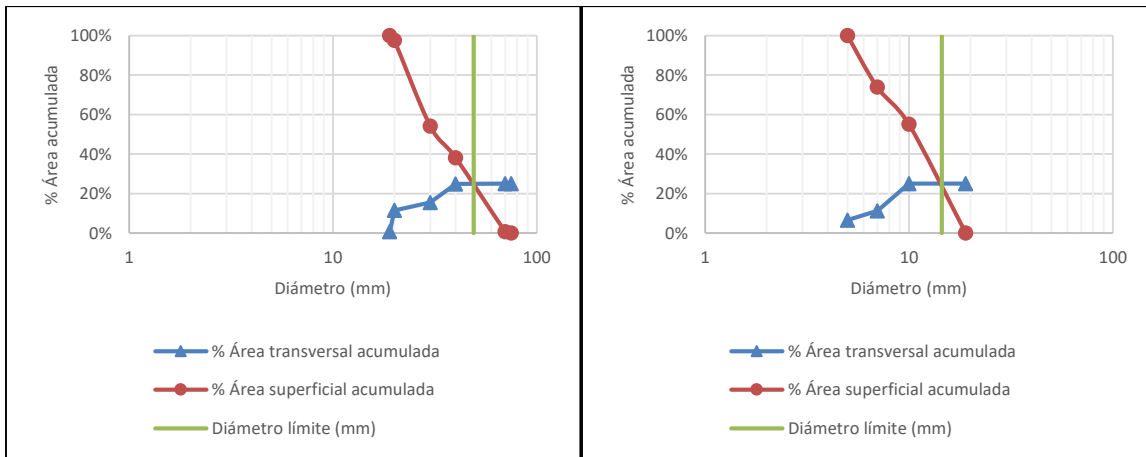


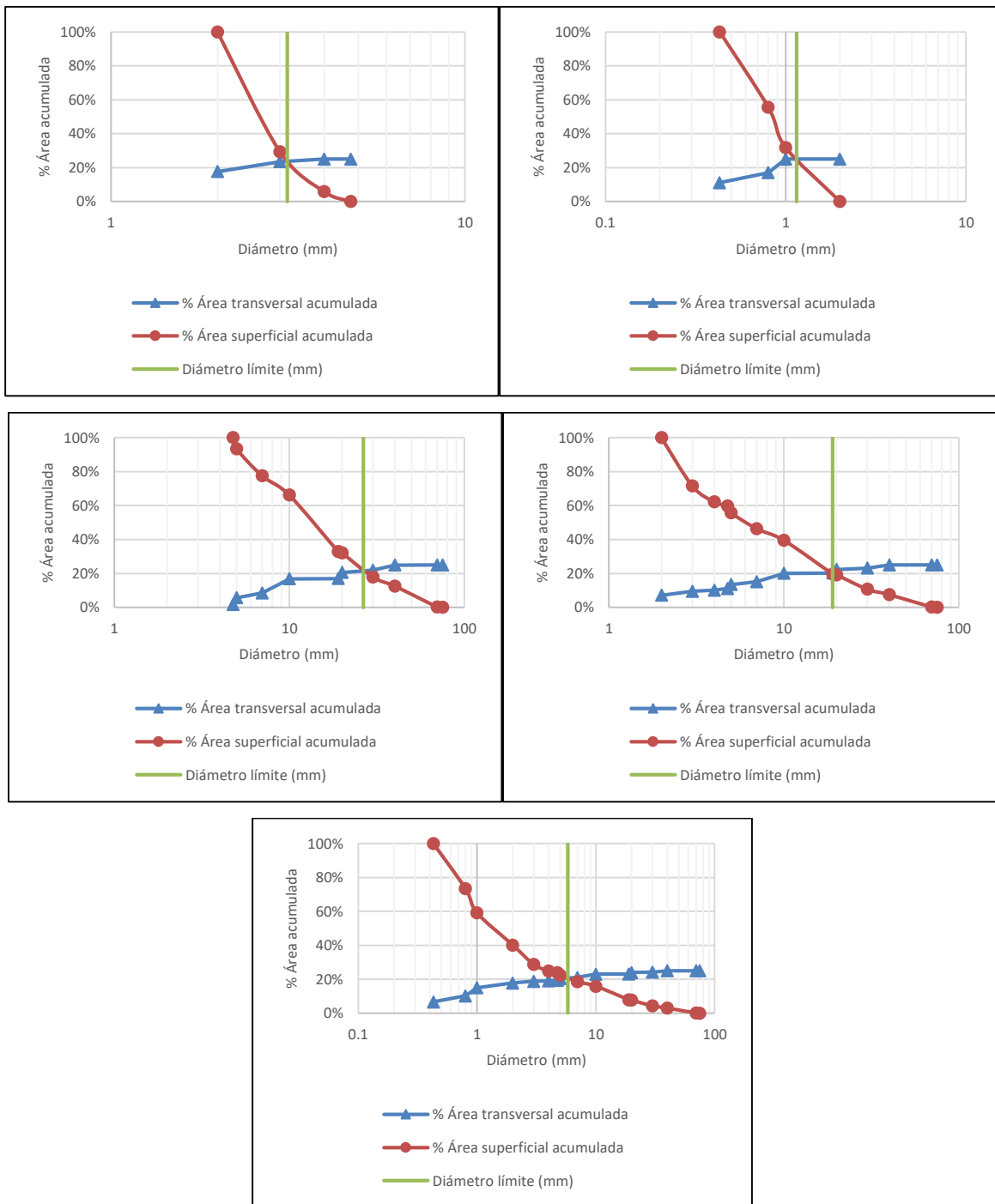
**Figura 4-15.** Resultados límite matriz bloque para material 5.1 (superior izquierda), 5.2 (superior derecha), 5.3 (intermedio izquierda), 5.4 (intermedio derecha) y 5.5 (inferior) usando la metodología de (Nanclares, 2018). Elaboración propia.



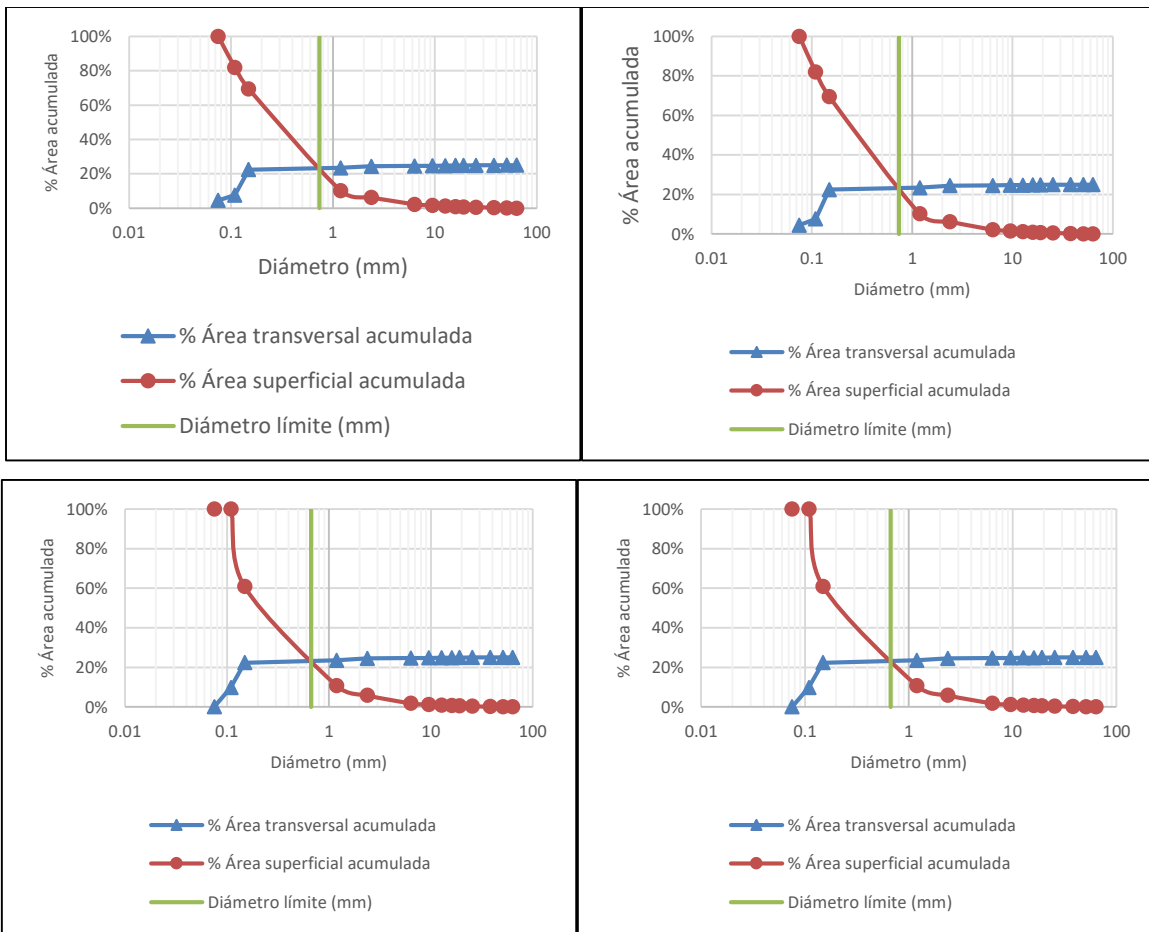


**Figura 4-16.** Resultados límite matriz bloque para material 6.1 (superior izquierda), 6.2 (superior derecha), 6.3 (intermedio izquierda), 6.4 (intermedio derecha) y 6.5 (inferior) usando la metodología de (Nanclares, 2018). Elaboración propia.

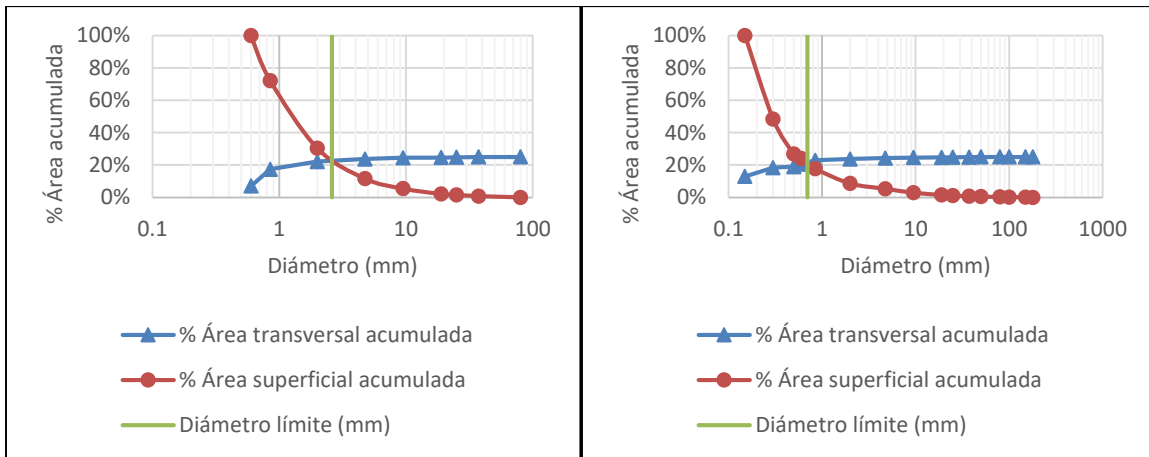


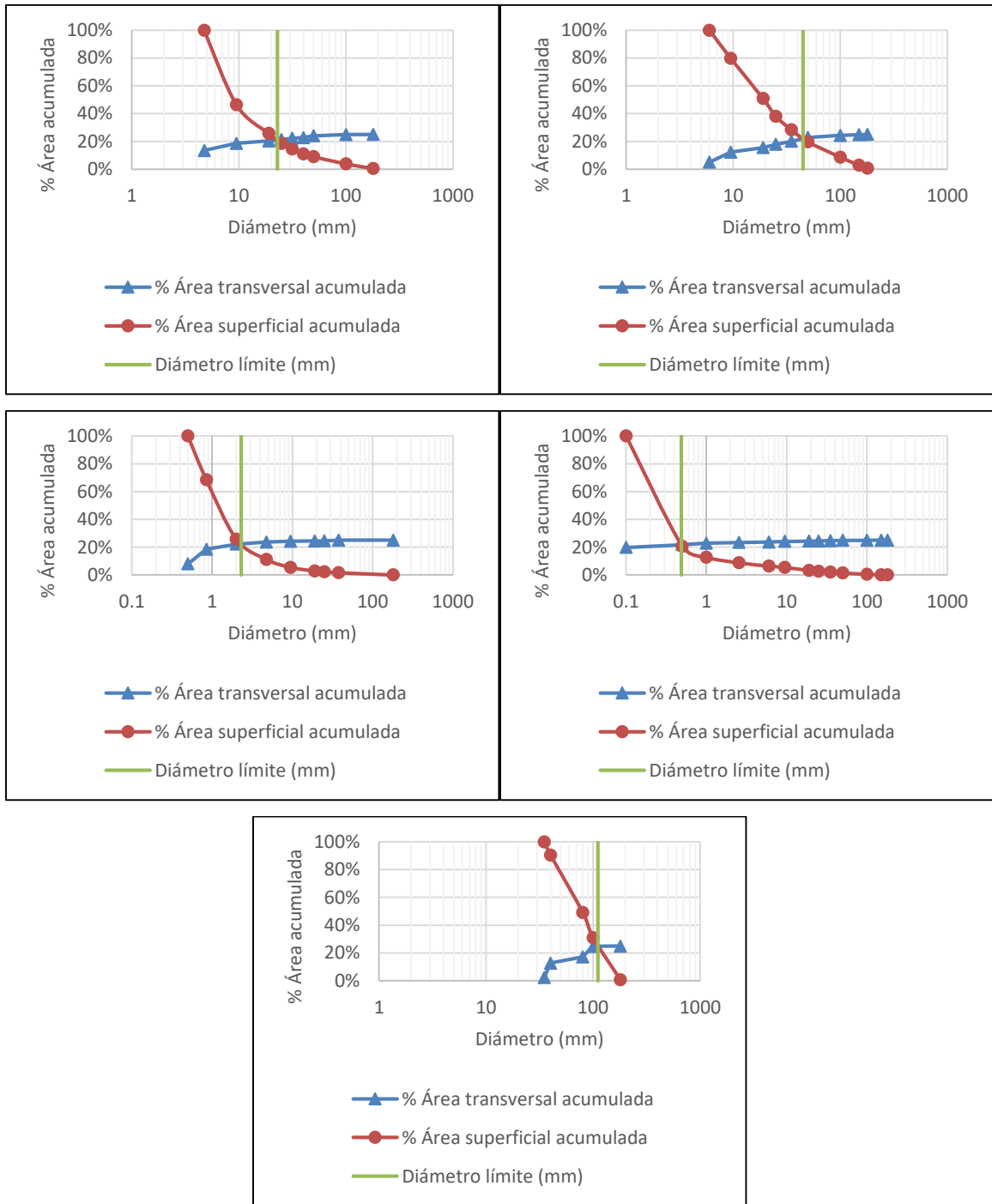


**Figura 4-17.** Resultados límite matriz bloque para material 7.1 (superior izquierda), 7.2 (superior derecha), 7.3 (intermedio-superior izquierda), 7.4 (intermedio-superior derecha), 7.5 (intermedio-inferior izquierda), 7.6 (intermedio-inferior derecha) y 7.7 (inferior) usando la metodología de (Nanclares, 2018). Elaboración propia.



**Figura 4-18.** Resultados límite matriz bloque para material 8.1 (superior izquierda), 8.2 (superior derecha), 8.3 (inferior izquierda) y 8.4 (inferior derecha) usando la metodología de (Nanclares, 2018).  
Elaboración propia.





**Figura 4-19.** Resultados límite matriz bloque para material 9.1 (superior izquierda), 9.2 (superior derecha), 9.3 (intermedio-superior izquierda), 9.4 (intermedio-superior derecha), 9.5 (intermedio-inferior izquierda), 9.6 (intermedio-inferior derecha) y 9.7 (inferior) usando la metodología de (Nanclares, 2018).  
Elaboración propia.

### 4.2.3 Comparación de límite entre matriz y bloque definidas por ambas metodologías

En las secciones anteriores, se obtuvieron los límites que separan la matriz de los bloques para los materiales estudiados, siguiendo las metodologías propuestas por (Medley E. , 1994) y (Nanclares, 2018). En la Tabla 4-3 se presenta la comparación de los resultados en ambos casos, usando el límite propuesto por Medley como base de la comparación. De acuerdo con ello, una diferencia porcentual negativa indica que el valor obtenido siguiendo las indicaciones de Nanclares es menor que el valor base, es decir, el propuesto por Medley. De manera análoga, un número positivo indica que el valor hallado con el método de Nanclares es mayor. La ecuación se presenta a continuación:

$$\Delta D = \frac{\text{Límite matriz/bloque}_{\text{Medley (1994)}} - \text{Límite matriz/bloque}_{\text{Nanclares (2008)}}}{\text{Límite matriz/bloque}_{\text{Medley (1994)}}} (\%) \quad (14)$$

**Tabla 4-3.** Comparativo entre las metodologías para determinar el límite entre matriz y bloque.

Código granulometría	Límite matriz bloque (mm)		$\Delta D$ (%)	%Lc (Nanclares, 2008)
	Medley (1994)	Nanclares (2008)		
1.1.	15.00	3.30	-78.0%	1.10%
1.2.	15.00	2.30	-84.7%	0.77%
2.1.	7.65	0.85	-88.9%	0.56%
2.2.	7.65	0.75	-90.2%	0.49%
2.3.	7.65	0.85	-88.9%	0.56%
2.4.	7.65	0.75	-90.2%	0.49%
3.1.	19.05	0.50	-97.4%	0.13%
3.2.	19.05	0.63	-96.7%	0.17%
4.1.	15.00	1.33	-91.1%	0.44%
4.2.	15.00	28.00	86.7%	9.33%
4.3.	15.00	1.05	-93.0%	0.35%
4.4.	15.00	21.50	43.3%	7.17%
5.1.	4.13	0.04	-99.0%	0.05%
5.2.	11.43	0.04	-99.6%	0.02%
5.3.	11.43	0.04	-99.7%	0.02%
5.4.	11.43	0.04	-99.6%	0.02%
5.5.	11.43	0.05	-99.6%	0.02%
6.1.	11.43	0.04	-99.7%	0.02%
6.2.	11.43	0.04	-99.6%	0.02%

Código granulometría	Límite matriz bloque (mm)		$\Delta D$ (%)	%Lc (Nanclares, 2008)
	Medley (1994)	Nanclares (2008)		
6.3	11.43	0.03	-99.7%	0.01%
6.4	11.43	0.03	-99.7%	0.01%
6.5	11.43	0.03	-99.7%	0.01%
7.1	15.00	49.00	226.7%	16.33%
7.2	15.00	14.50	-3.3%	4.83%
7.3	15.00	3.15	-79.0%	1.05%
7.4	15.00	1.15	-92.3%	0.38%
7.5	15.00	26.50	76.7%	8.83%
7.6	15.00	19.00	26.7%	6.33%
7.7	15.00	5.80	-61.3%	1.93%
8.1	15.00	0.74	-95.1%	0.25%
8.2	15.00	0.74	-95.1%	0.25%
8.3	15.00	0.67	-95.5%	0.22%
8.4	15.00	0.67	-95.5%	0.22%
9.1	56.50	2.60	-95.4%	0.23%
9.2	56.50	0.70	-98.8%	0.06%
9.3	56.50	23.00	-59.3%	2.04%
9.4	56.50	45.00	-20.4%	3.98%
9.5	56.50	11.00	-80.5%	0.97%
9.6	56.50	2.30	-95.9%	0.20%
9.7	56.50	0.49	-99.1%	0.04%

Elaboración propia.

Los resultados presentados en la Tabla 4-3 evidencian que el límite propuesto por Nanclares es menor en la mayoría de los geomateriales estudiados; siendo esta diferencia importante en muchos casos. En promedio, el valor propuesto por Nanclares es un 65% menor que el de Medley.

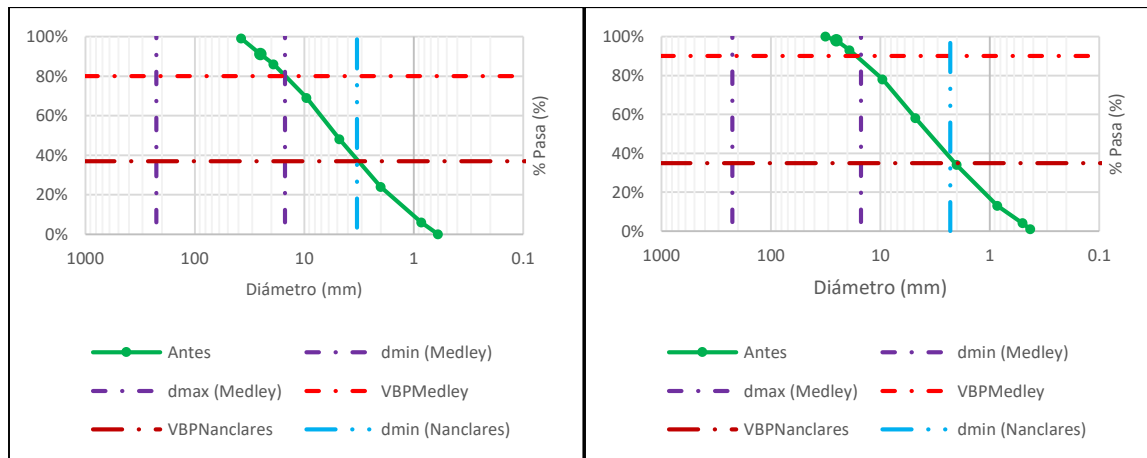
Este resultado respalda los hallazgos de (Coli, Berry, & Boldini, 2008); los cuales determinaron que la distribución del tamaño de bloques de un Complejo Caótico de Esquisto-Calizas ubicado en la Toscana italiana, conserva la fractalidad sugerida por autores como (Lindquist E. , 1991) o (Medley E. , 1994); sin embargo, el valor que separa la matriz de los bloques para ese material fue mucho menor y aproximadamente igual al 0,25% de la  $L_c$  (Ver Figura 2-13). Esto es indicio de que el límite que separa matriz de bloques no solo está dado por la longitud característica del problema  $L_c$  (el ancho de la

fundación, la altura del talud, el diámetro del espécimen de laboratorio), sino que también se puede ver influenciado por el material mismo y su distribución granulométrica.

De acuerdo con lo anterior, se llevó a cabo el ejercicio de comparar el límite matriz/bloque por la metodología de (Nanclares, 2018), con el diámetro de muestra (es decir, la  $L_c$ ) de cada material estudiado. Los resultados se presentan en la última columna de la Tabla 4-3. De ellos, se evidencia que la mayoría de los valores (el 72.5% de los materiales estudiados) se encuentran por debajo del 1% de  $L_c$ . En promedio, el límite matriz/bloque hallado con la propuesta de Nanclares, corresponde al 1,75% de  $L_c$ , comparado con el 5,0% de  $L_c$  del método de Medley.

### 4.3 Determinación de la proporción volumétrica de bloques $VBP$

Tras definir el límite que separa la matriz de los bloques haciendo uso de las metodologías de (Medley E. , 1994) y (Nanclares, 2018), se procede a determinar la proporción volumétrica de bloques  $VBP$ .

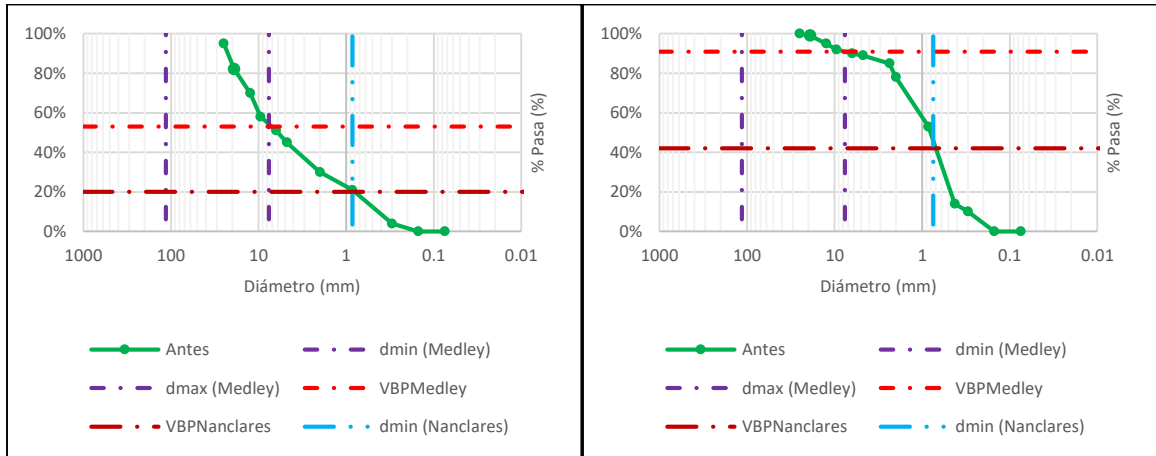


**Figura 4-20.** Resultados VBP para material 1.1 (izquierda) y 1.2 (derecha).  
Elaboración propia.

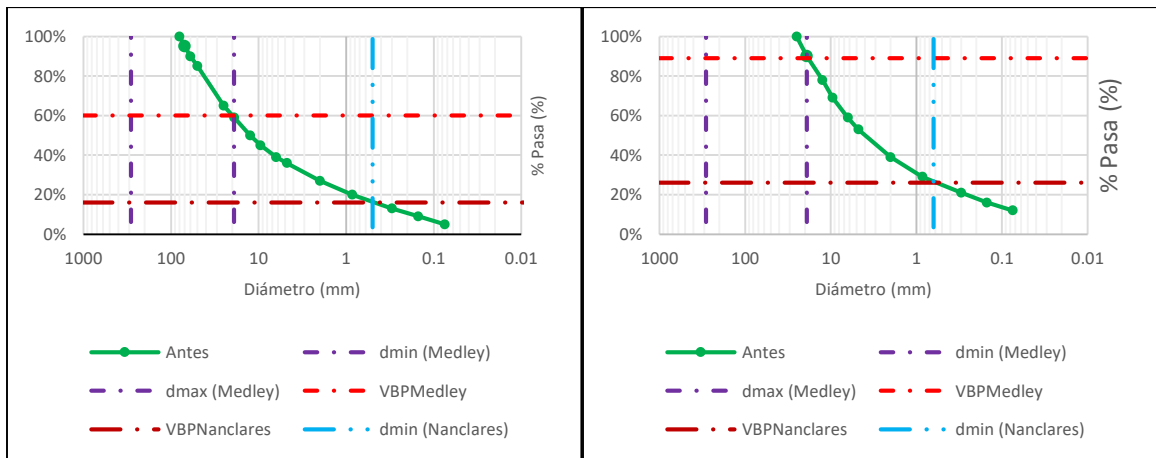
Como se mencionó en el capítulo 2.2.3, la  $VBP$  se puede determinar por diferentes formas. Una de ellas es haciendo uso de registros de perforación, asumiendo que la proporción lineal ( $1D$ ) de bloques es igual a la proporción volumétrica ( $3D$ ). Otro método es a partir de



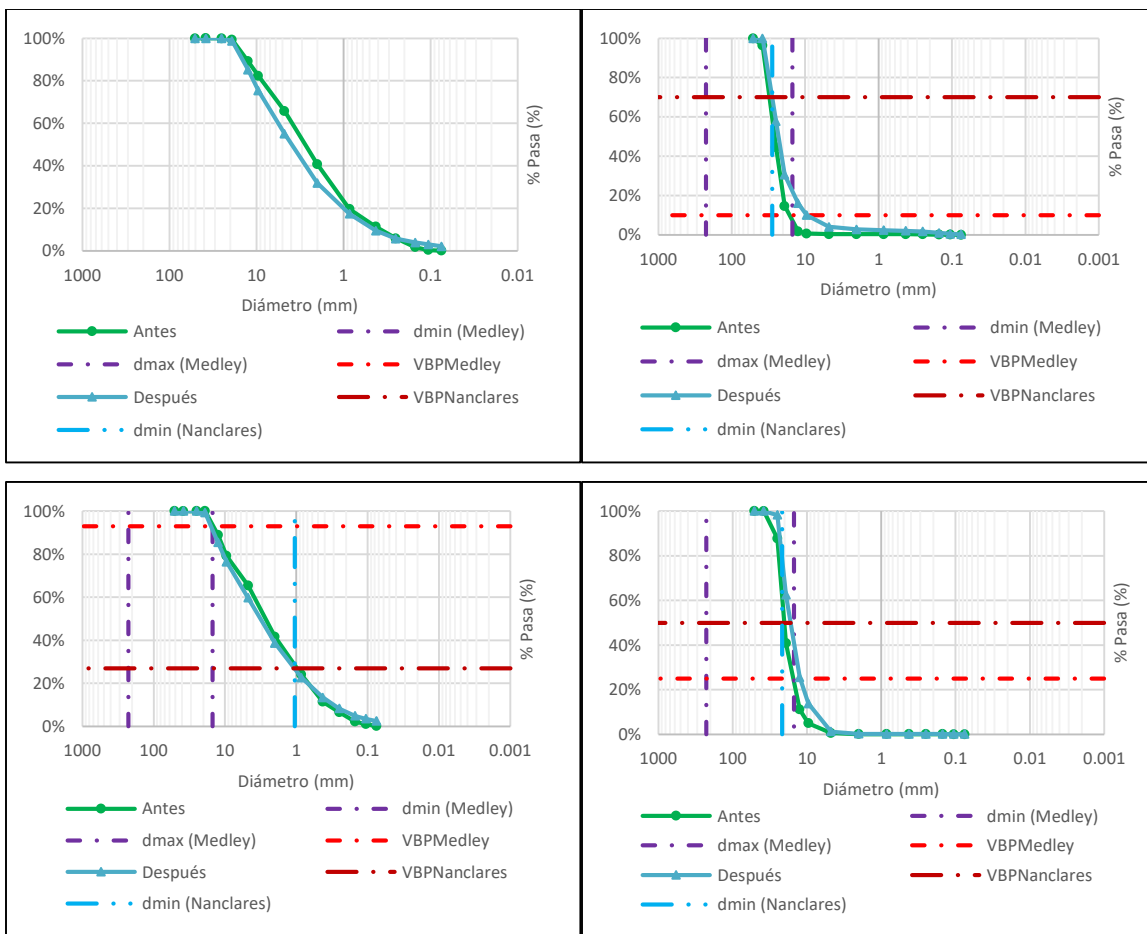
análisis digital de imagen, partiendo de la misma premisa; es decir, que la proporción areal (2D) es igual a la volumétrica (3D). En este caso, dado que se cuentan con las curvas granulométricas de los materiales estudiados y conforme con lo expuesto por (Lindquist E. S., 1994), apud (Edmund & Dimitrios, 2011) (Ver capítulo 2.2.3), se hará uso de ese insumo para hallar *VBP*. A continuación, se presentan los resultados:



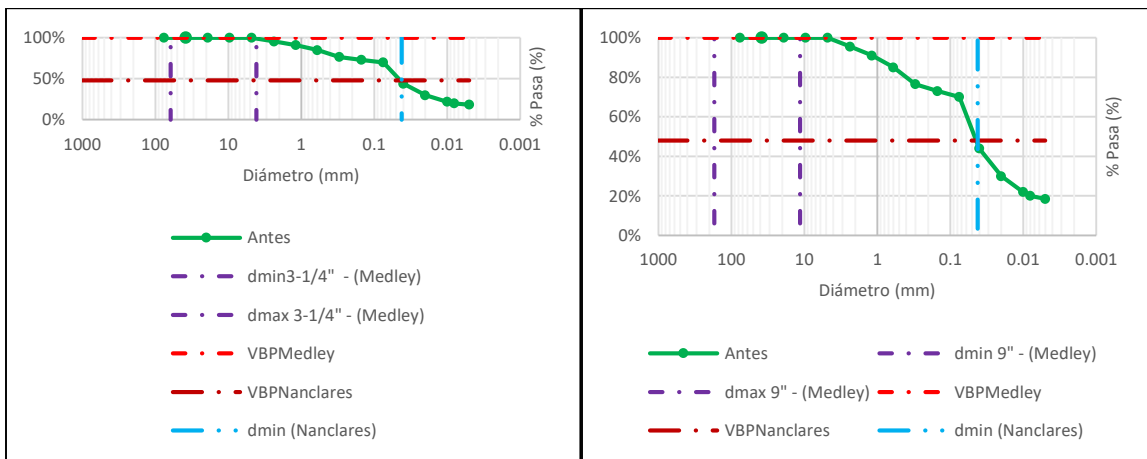
**Figura 4-21.** Resultados VBP para material 2.1, 2.3 (izquierda), 2.2 y 2.4 (derecha). Elaboración propia.

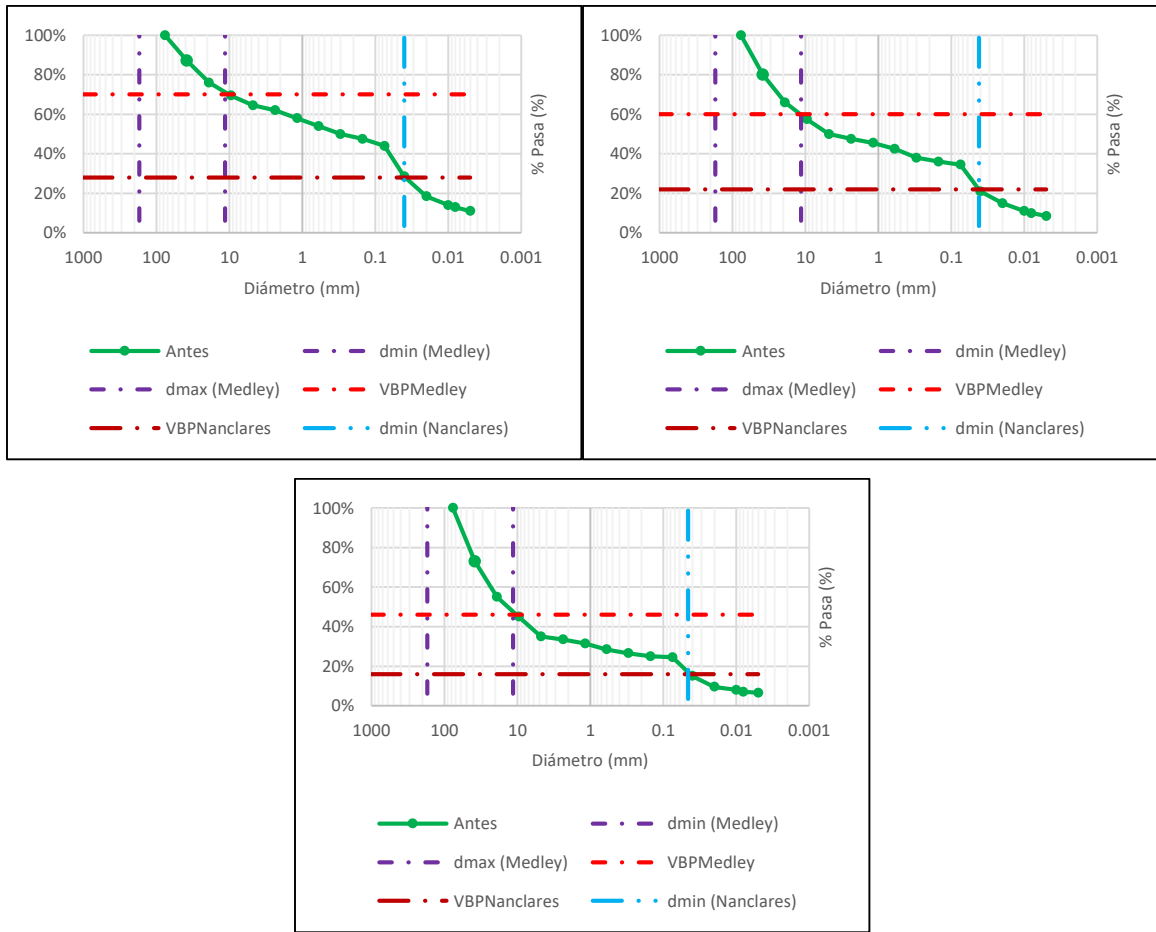


**Figura 4-22.** Resultados VBP para material 3.1 (izquierda) y 3.2 (derecha). Elaboración propia.

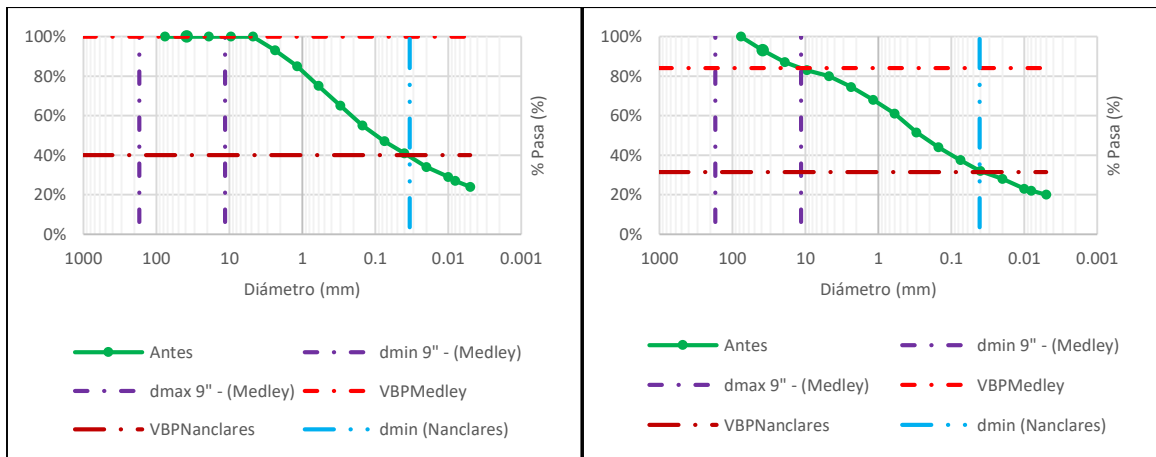


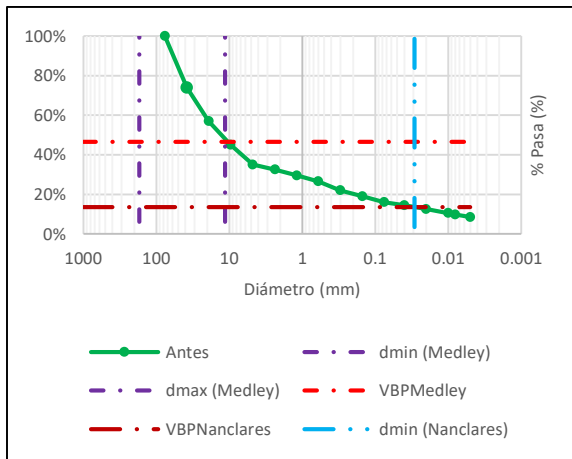
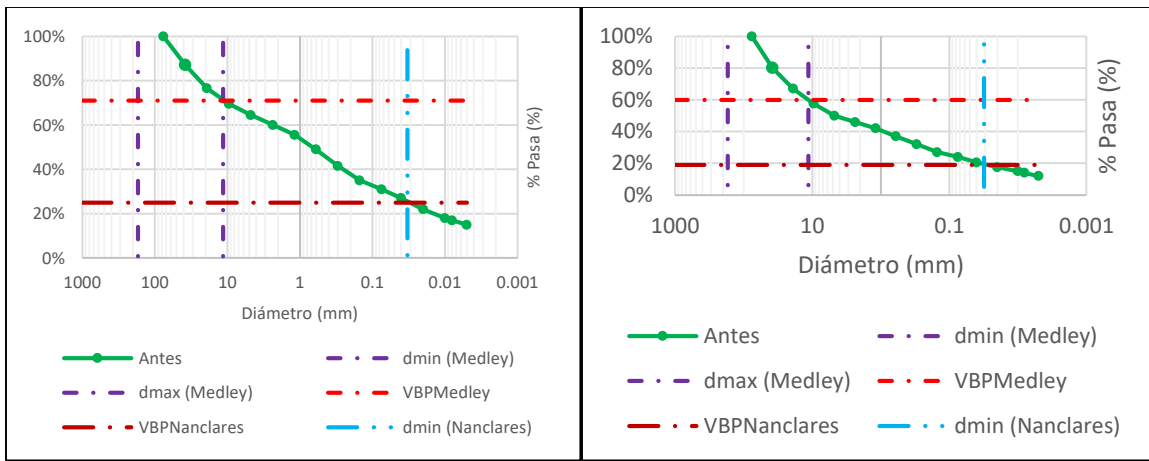
**Figura 4-23.** Resultados VBP para material 4.1 (superior izquierda), 4.2 (superior derecha), 4.3 (inferior izquierda) y 4.4 (inferior derecha).  
Elaboración propia.



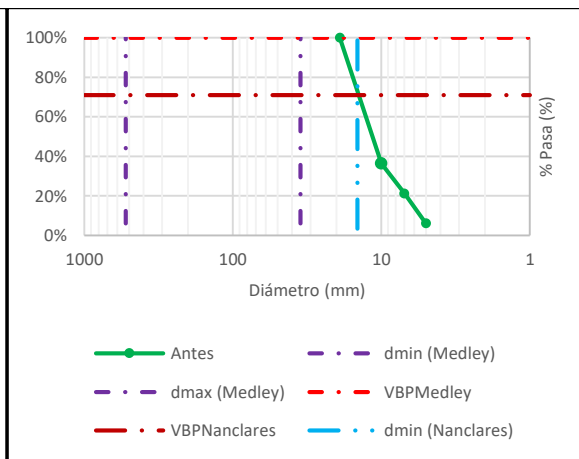
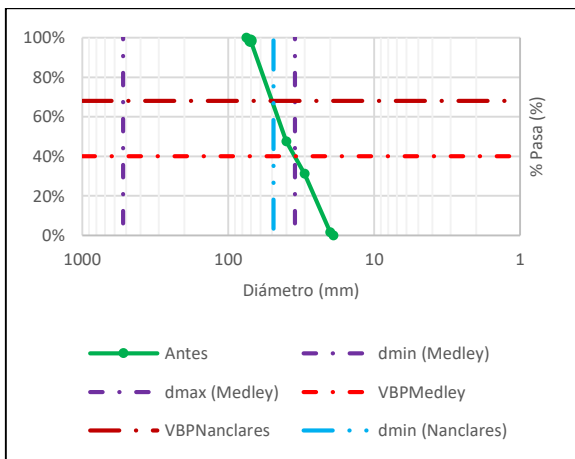


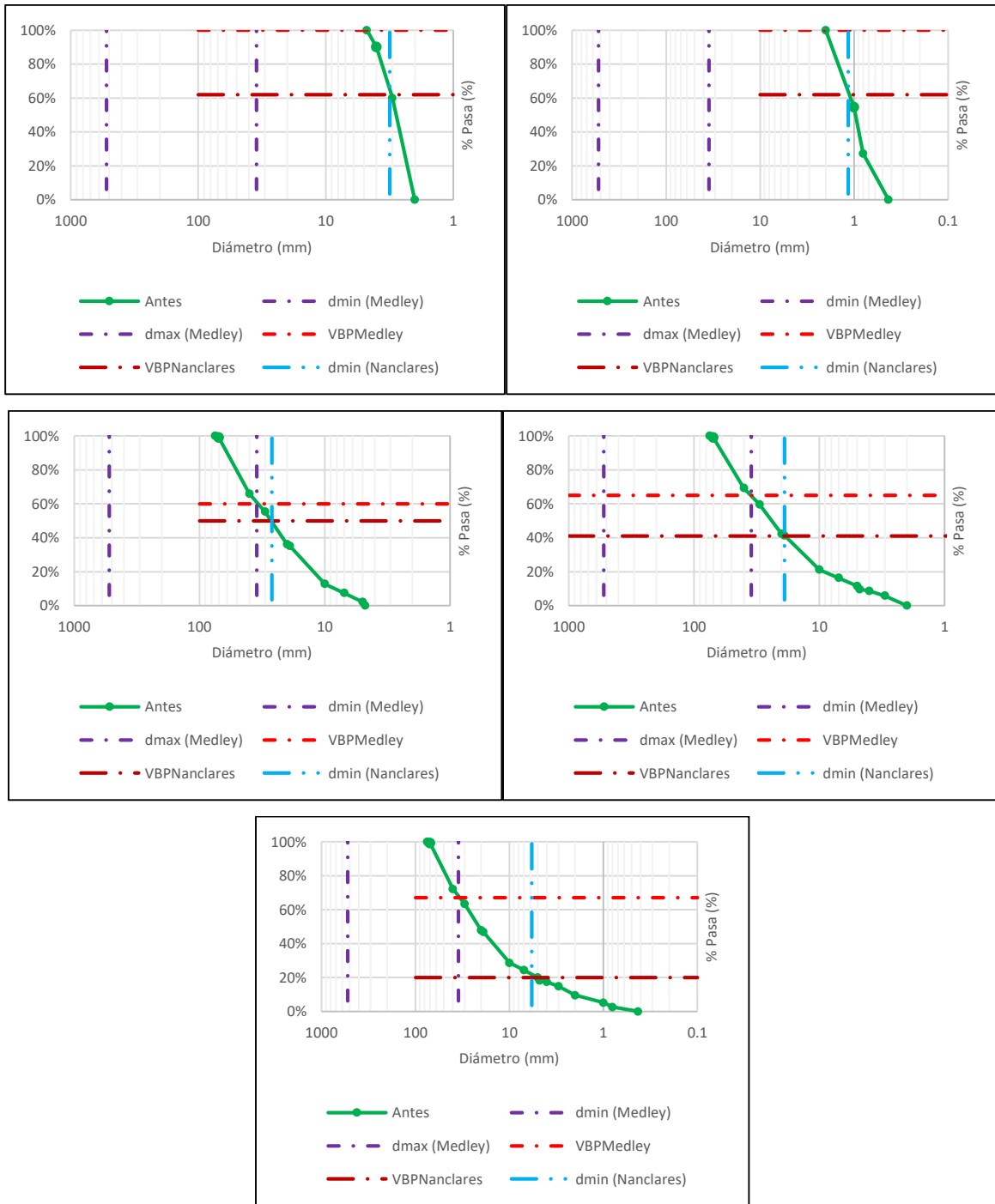
**Figura 4-24.** Resultados VBP para material 5.1 (superior izquierda), 5.2 (superior derecha), 5.3 (intermedio izquierda), 5.4 (intermedio derecha) y 5.5 (inferior). Elaboración propia.



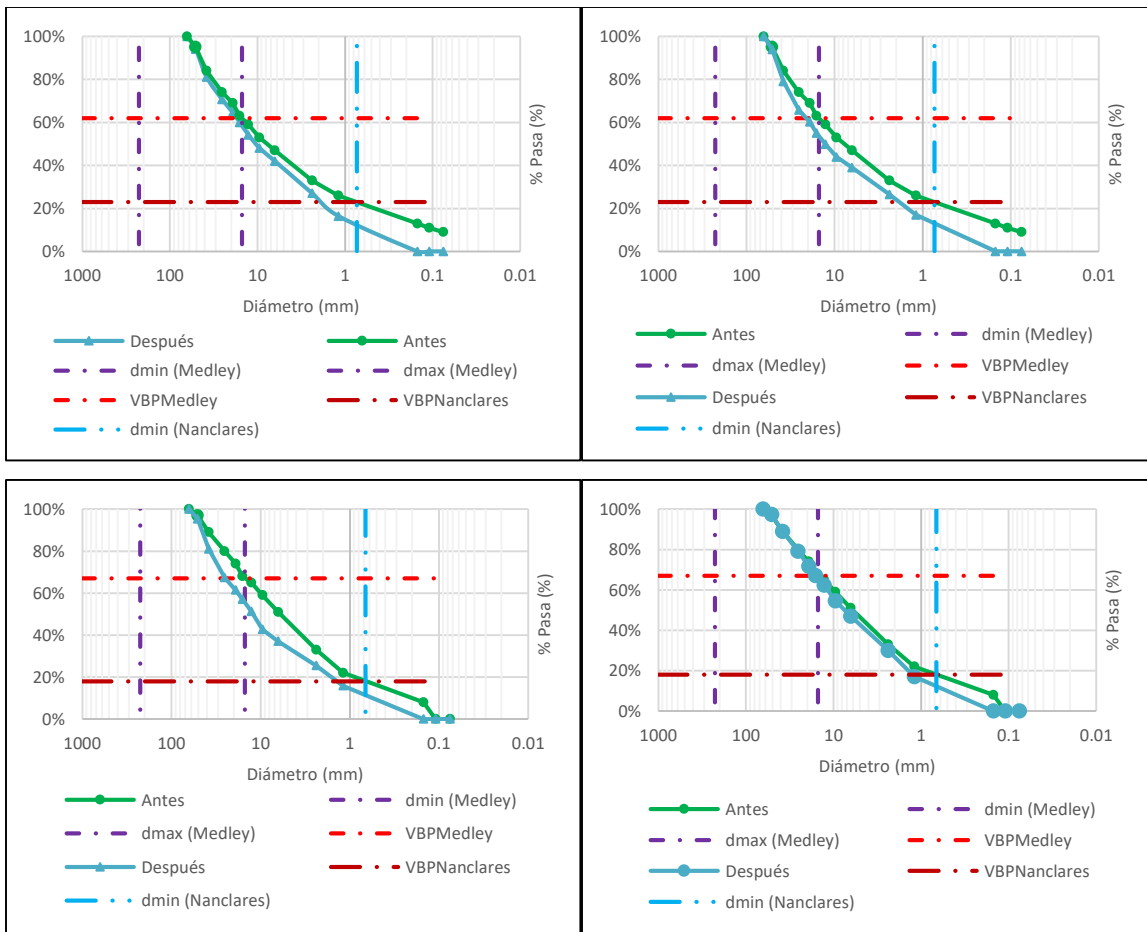


**Figura 4-25.** Resultados VBP para material 6.1 (superior izquierda), 6.2 (superior derecha), 6.3 (intermedio izquierda), 6.4 (intermedio derecha) y 6.5 (inferior).  
Elaboración propia.





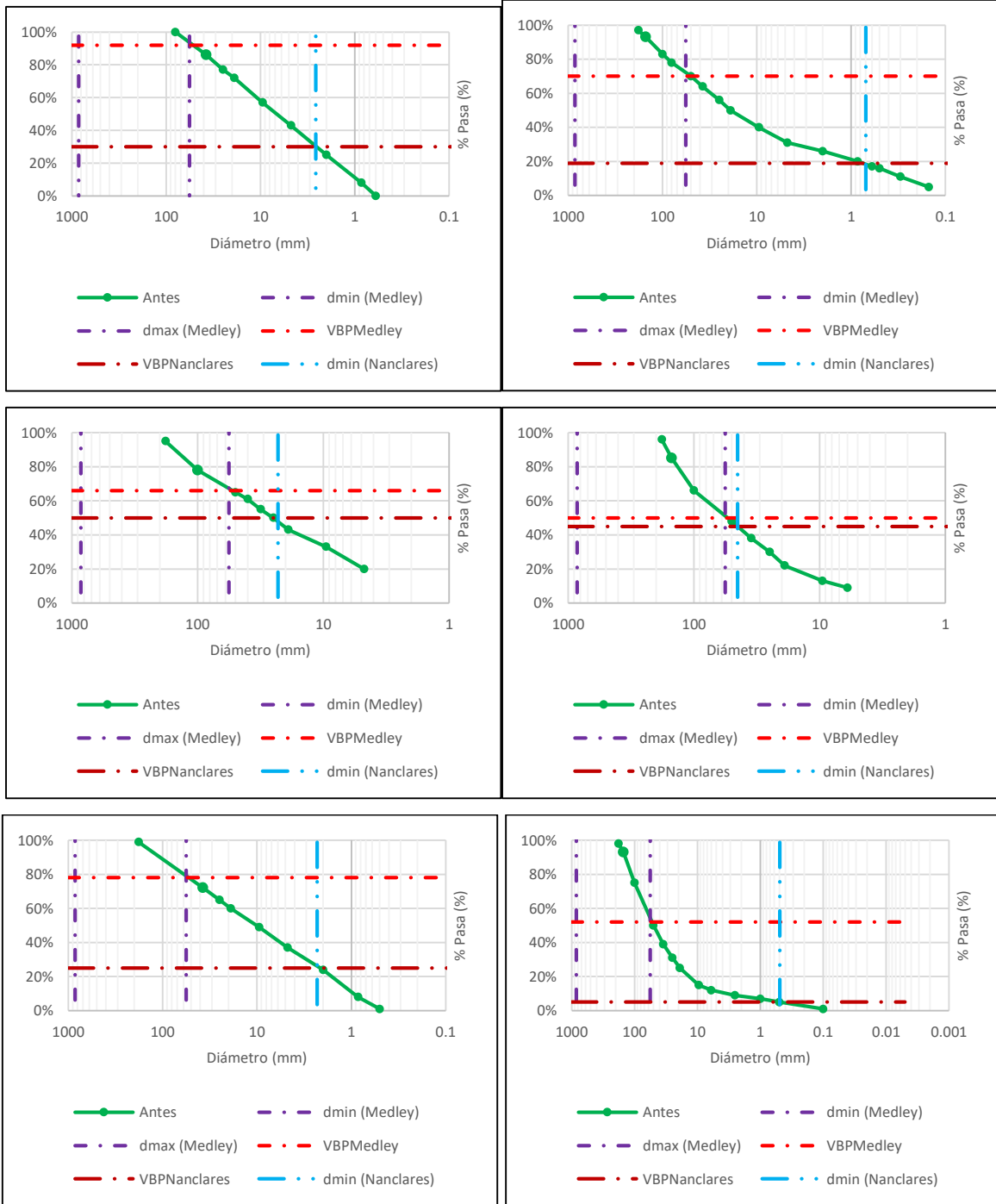
**Figura 4-26.** Resultados VBP para material 7.1 (superior izquierda), 7.2 (superior derecha), 7.3 (intermedio-superior izquierda), 7.4 (intermedio-superior derecha), 7.5 (intermedio-inferior izquierda), 7.6 (intermedio-inferior derecha) y 7.7 (inferior). Elaboración propia.

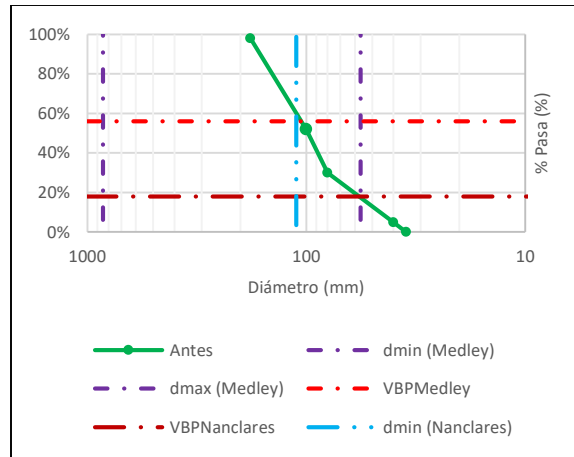


**Figura 4-27.** Resultados VBP para material 8.1 (superior izquierda), 8.2 (superior derecha), 8.3 (inferior izquierda) y 8.4 (inferior derecha).  
Elaboración propia.

En la Tabla 4-4 se resumen los resultados obtenidos usando ambas metodologías. De nuevo se hace un comparativo entre los valores de *VBP* encontrados siguiendo los procedimientos propuestos por los autores estudiados. La ecuación usada para encontrar la diferencia entre valores de *VBP* se presenta enseguida:

$$\Delta VBP = \frac{VBP_{Medley(1994)} - VBP_{Nanclares(2008)}}{VBP_{Medley(1994)}} (\%) \quad (15)$$





**Figura 4-28.** Resultados VBP bloque para material 9.1 (superior izquierda), 9.2 (superior derecha), 9.3 (intermedio-superior izquierda), 9.4 (intermedio-superior derecha), 9.5 (intermedio-inferior izquierda), 9.6 (intermedio-inferior derecha) y 9.7 (inferior). Elaboración propia.

Como era de esperarse, debido a que en general el límite que separa la matriz de los bloques usando la metodología propuesta por (Nanclares, 2018) es inferior al encontrado con el método de (Medley E. , 1994), la *VBP* del primer autor es mayor a la del segundo en la mayoría de los casos. En promedio se tiene que la *VBP* encontrada con el método de Nanclares es un 213% mayor a la determinada con la propuesta de Medley.

**Tabla 4-4.** VBP para los materiales estudiados usando la metodología de (Medley E. , 1994) y (Nanclares, 2018).

Código granulometría	VBP (%)		$\Delta$ VBP (%)	Código granulometría	VBP (%)		$\Delta$ VBP (%)
	Medley (1994)	Nanclares (2008)			Medley (1994)	Nanclares (2008)	
1.1.	20%	63%	215.0%	5.3	30%	72%	140.0%
1.2.	10%	65%	550.0%	5.4	40%	78%	95.0%
2.1.	47%	80%	70.2%	5.5	54%	84%	55.6%
2.2.	9%	58%	544.4%	6.1	0%	60%	N/A
2.3	47%	80%	70.2%	6.2	16%	69%	328.1%
2.4	9%	58%	544.4%	6.3	29%	75%	158.6%
3.1.	40%	84%	110.0%	6.4	40%	81%	102.5%
3.2	11%	74%	572.7%	6.5	54%	87%	61.7%
4.1	7%	66%	842.9%	7.1	60%	32%	-46.7%
4.2	80%	17%	-79.2%	7.2	0%	29%	N/A
4.3	7%	73%	942.9%	7.3	0%	38%	N/A
4.4	75%	50%	-33.3%	7.4	0%	38%	N/A
5.1	0%	52%	N/A	7.5	40%	50%	25.0%
5.2	0%	52%	N/A	7.6	35%	59%	68.6%



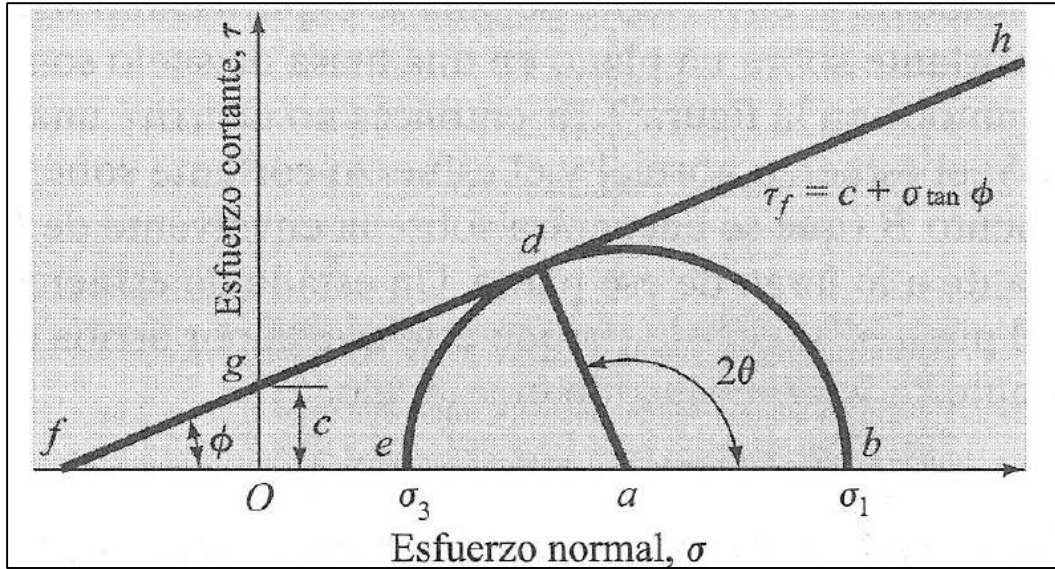
Código granulometría	VBP (%)		$\Delta$ VBP (%)	Código granulometría	VBP (%)		$\Delta$ VBP (%)
	Medley (1994)	Nanclares (2008)			Medley (1994)	Nanclares (2008)	
7.7	33%	80%	142.4%	9.2	30%	81%	170.0%
8.1	38%	77%	102.6%	9.3	34%	50%	47.1%
8.2	38%	77%	102.6%	9.4	50%	55%	10.0%
8.3	33%	82%	148.5%	9.5	58%	91%	56.9%
8.4	33%	82%	148.5%	9.6	22%	75%	240.9%
9.1	8%	70%	775.0%	9.7	62%	50%	-19.4%

#### 4.4 Determinación de parámetros de resistencia al corte ( $c'$ y $\phi'$ )

Para la definición de los parámetros de resistencia al corte se implementó el criterio de falla de Mohr-Coulomb (Mohr, 1900), apud (Braja M. Das, 2001)). Este establece que la falla ocurrirá por una combinación crítica de esfuerzo normal y esfuerzo cortante.

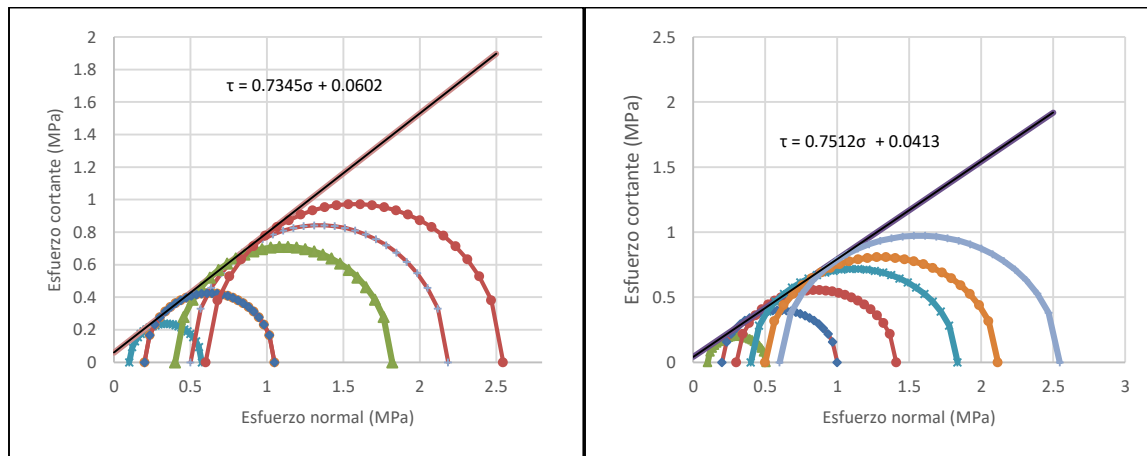
La envolvente de falla definida por este criterio es una línea curva; sin embargo, para la mayoría de problemas de mecánica de suelos es suficiente aproximar el esfuerzo cortante sobre el plano de falla como una función lineal del esfuerzo normal (Coulomb, 1776) apud (Braja M. Das, 2001)).

De acuerdo con lo anterior, la envolvente de falla queda definida por dos parámetros, el intercepto de la recta o cohesión  $c$  y la pendiente o  $\tan \phi$ . En la Figura 4-29 se presenta la envolvente de falla y los parámetros de resistencia al corte del material. Dadas las características de los materiales estudiados en este trabajo (mezclas de suelo y bloques de roca), la resistencia al corte estará definida por parámetros efectivos  $c'$  y  $\phi'$ . Para garantizar esto, los ensayos ejecutados en campo se hicieron a una velocidad baja, de tal forma que no se generasen presiones de poros. En cuanto a los valores obtenidos de la literatura técnica, se procuró que los datos utilizados se obtuviesen de pruebas consolidadas y drenadas.

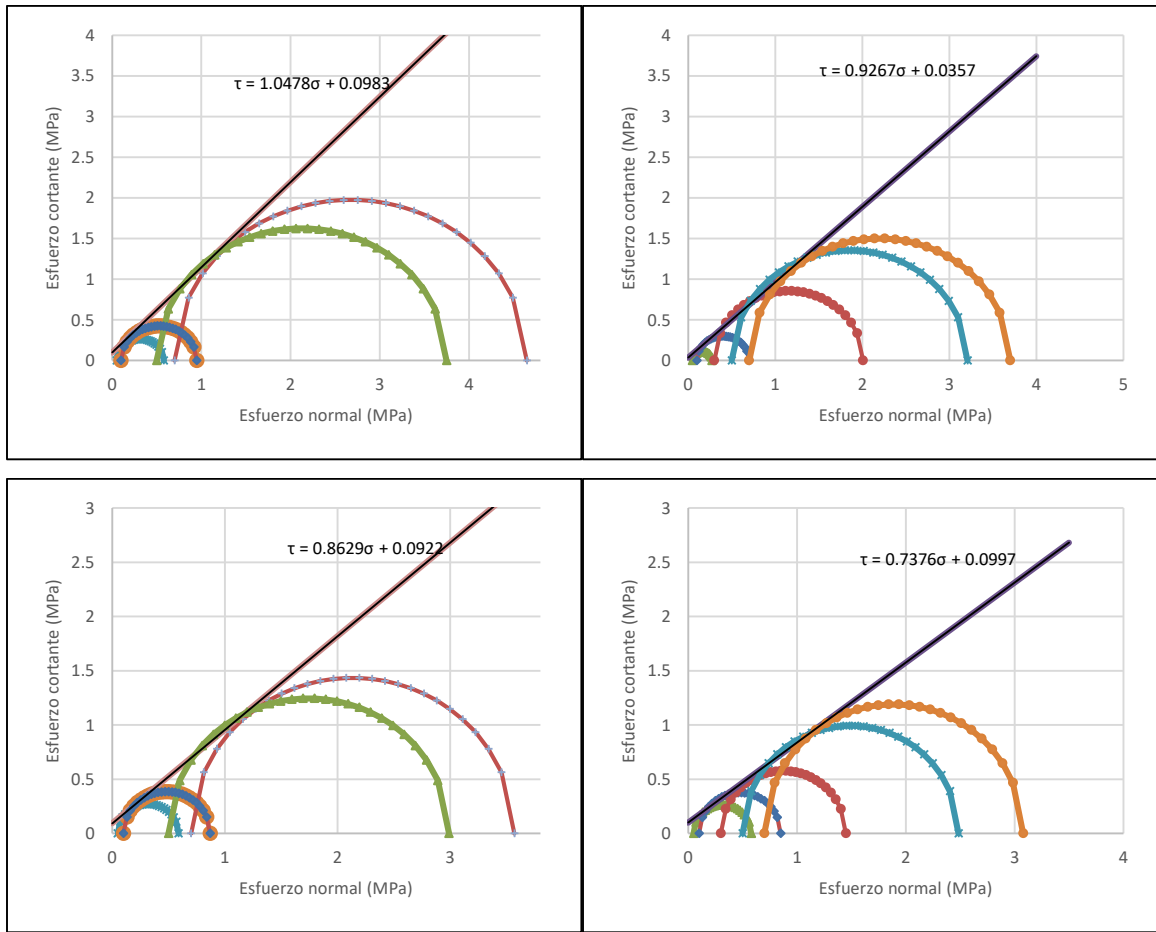


**Figura 4-29.** Envolvente de falla de Mohr-Coulomb. Tomado de (Braja M. Das, 2001)

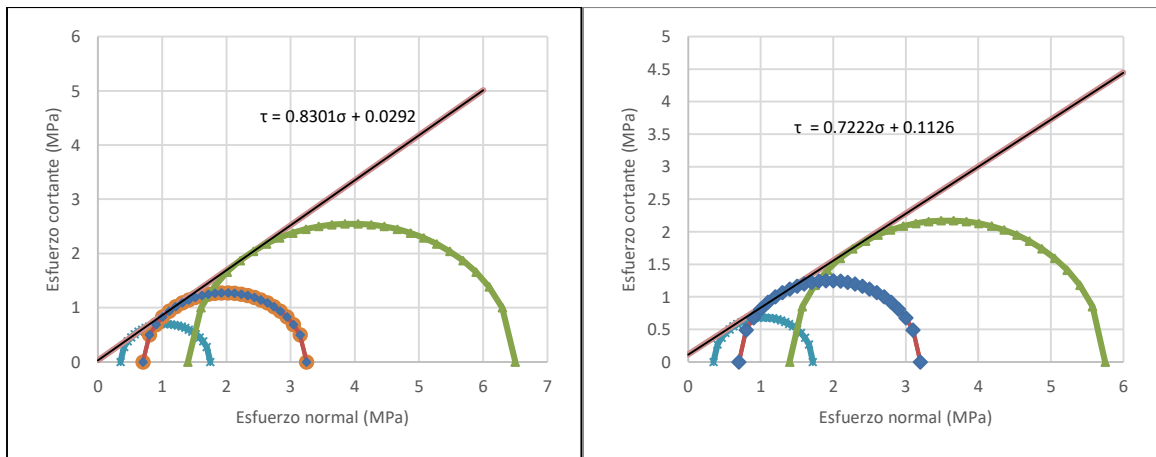
A continuación, se presentan las envolventes de falla para los materiales estudiados. Estas fueron obtenidas de la información extraída de las curvas esfuerzo-deformación, en donde se definió como criterio, usar el esfuerzo cortante pico o máximo que soporta el material.



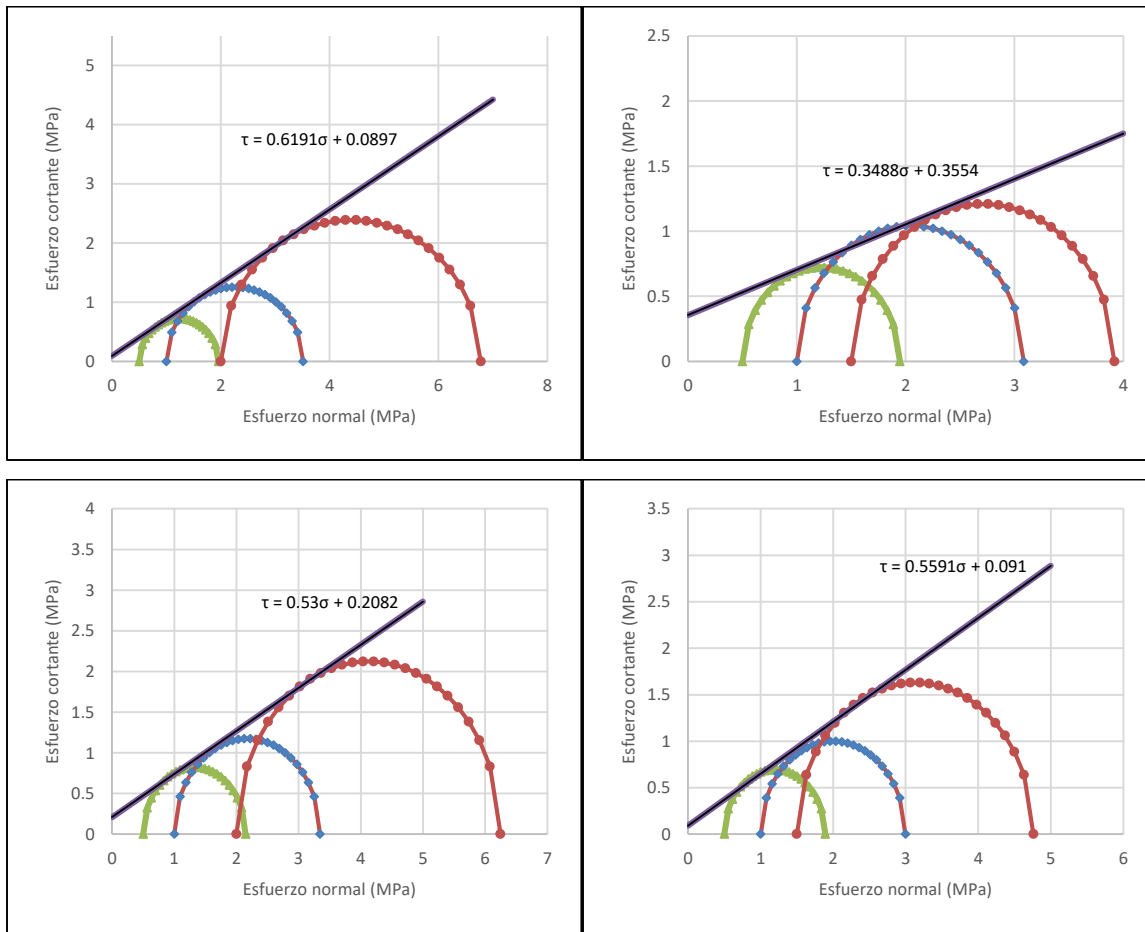
**Figura 4-30.** Envolvente de falla para material 1.1 (izquierda) y 1.2 (derecha). Elaboración propia.



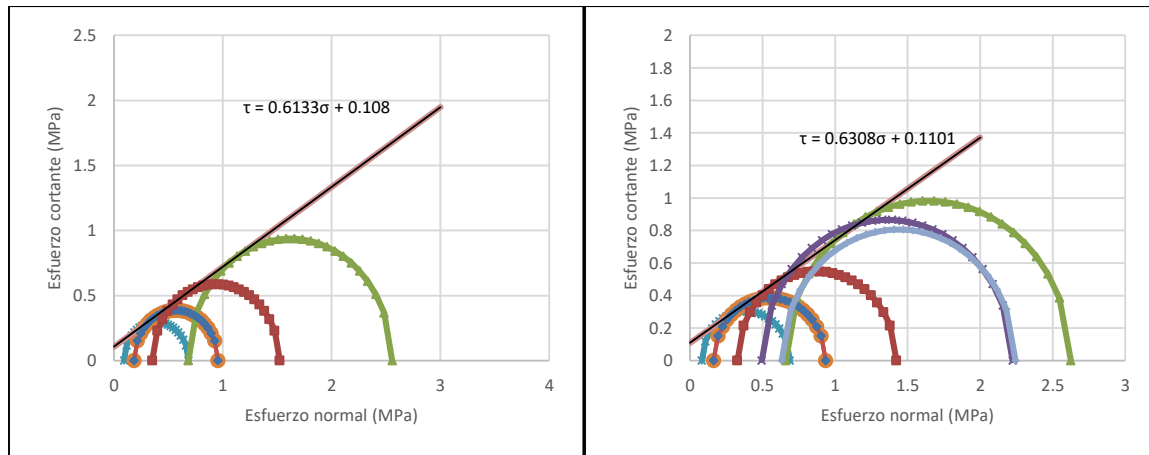
**Figura 4-31.** Envolvente de falla para material 2.1 (superior izquierda), 2.2 (superior derecha), 2.3 (inferior izquierda) y 2.4 (inferior derecha).  
Elaboración propia.

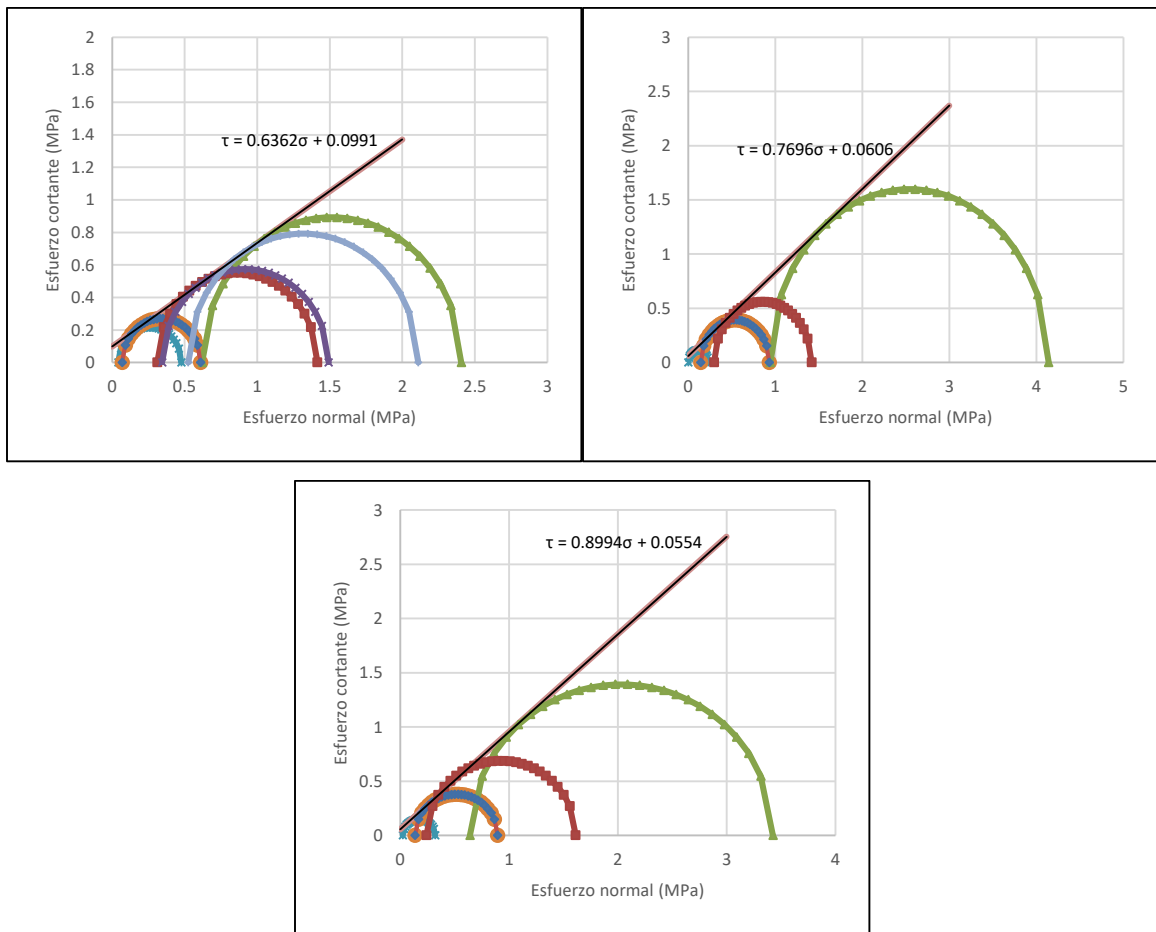


**Figura 4-32.** Envolvente de falla para material 3.1 (izquierda) y 3.2 (derecha).  
Elaboración propia.

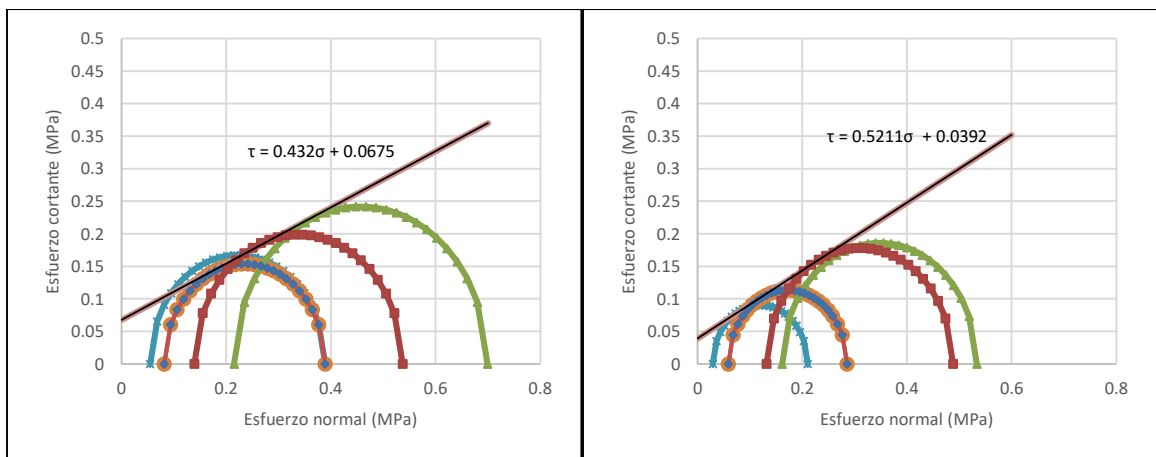


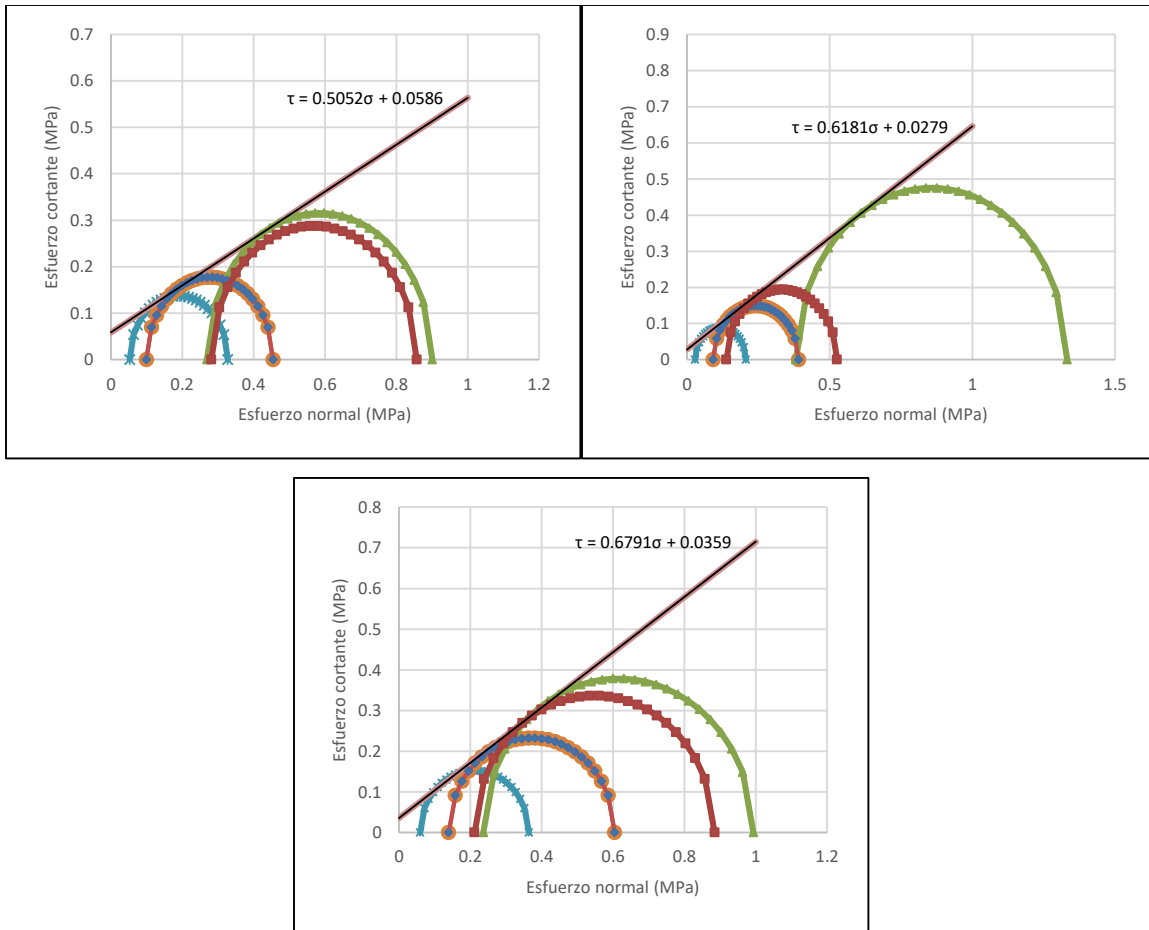
**Figura 4-33.** Envolvente de falla para material 4.1 (superior izquierda), 4.2 (superior derecha), 4.3 (inferior izquierda) y 4.4 (inferior derecha).  
Elaboración propia.



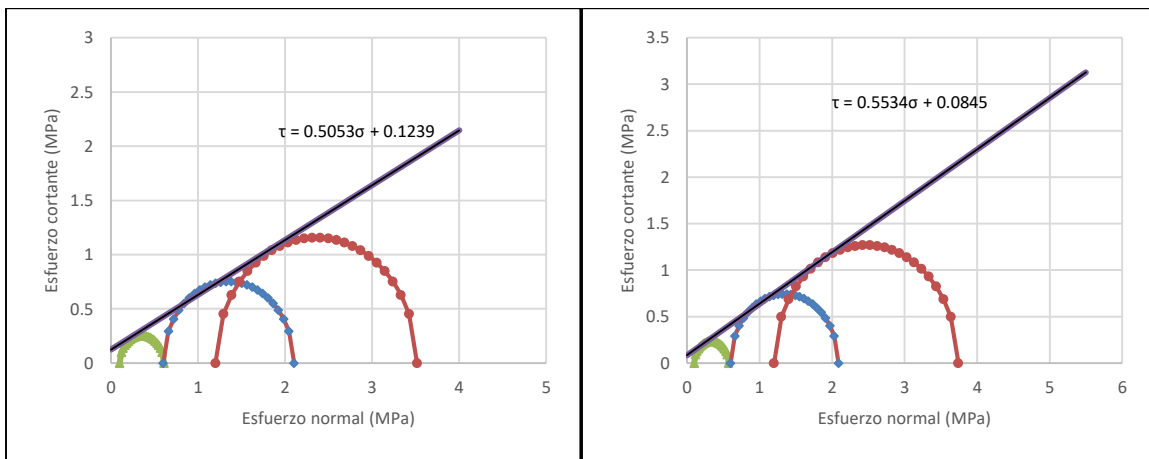


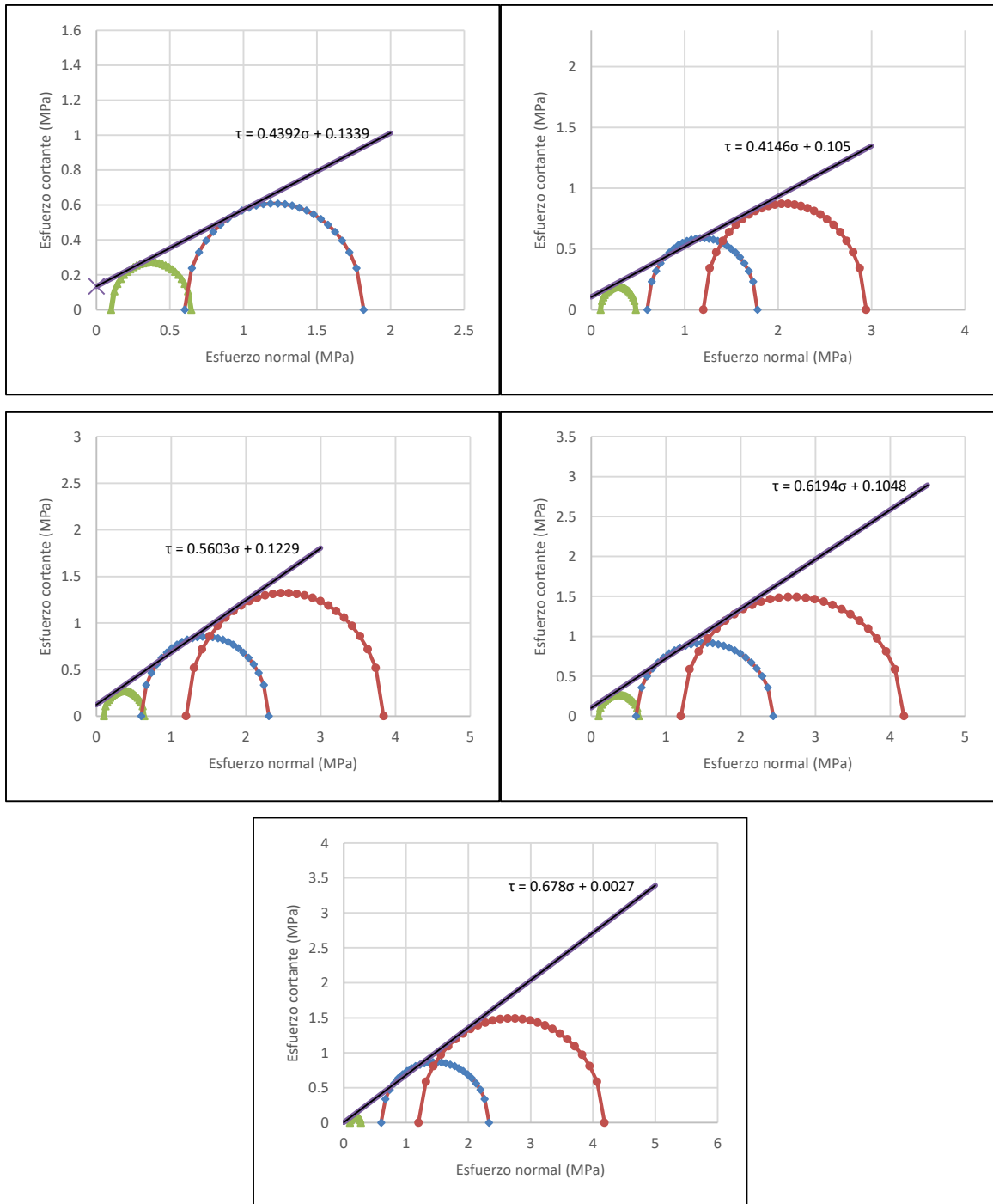
**Figura 4-34.** Envoltente de falla para material para material 5.1 (superior izquierda), 5.2 (superior derecha), 5.3 (intermedio izquierda), 5.4 (intermedio derecha) y 5.5 (inferior). Elaboración propia.



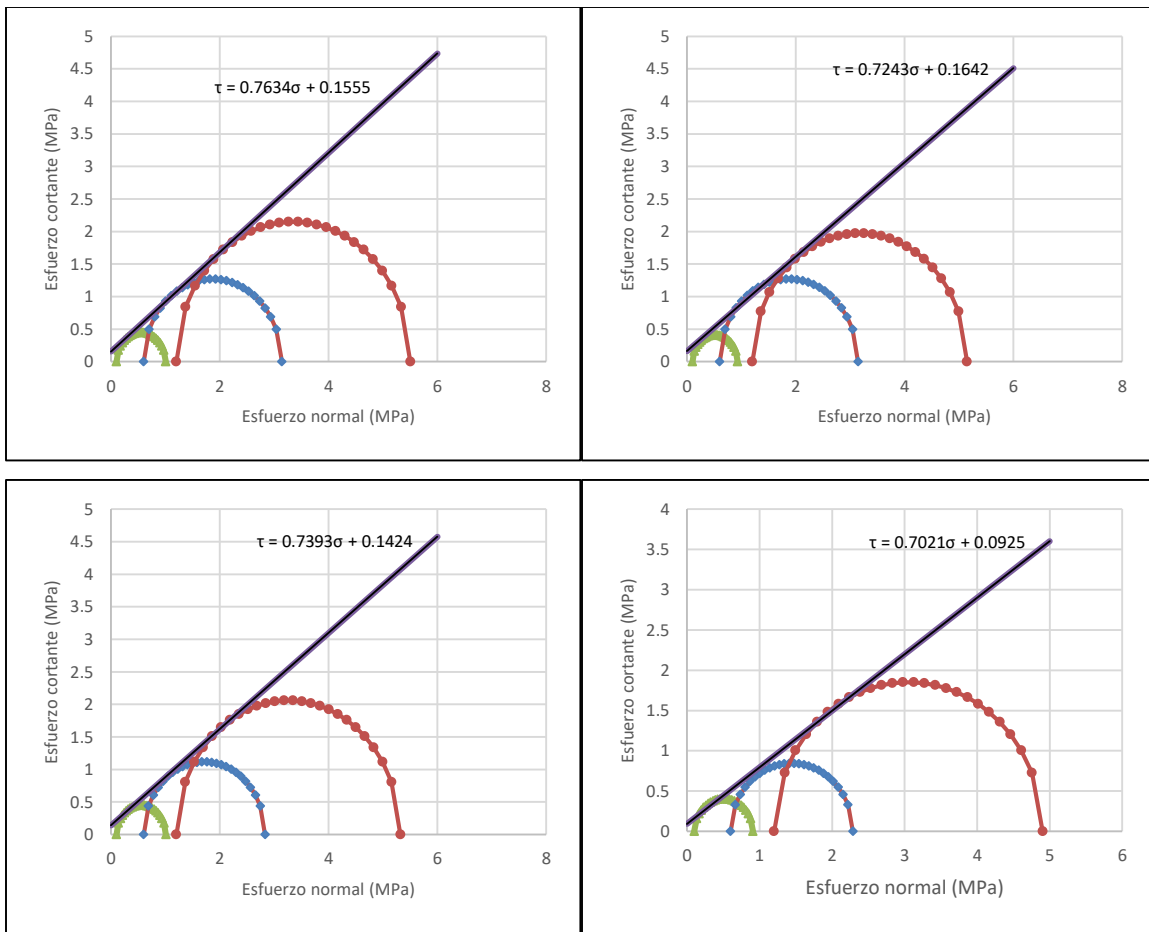


**Figura 4-35.** Envoltente de falla para material para material 6.1 (superior izquierda), 6.2 (superior derecha), 6.3 (intermedio izquierda), 6.4 (intermedio derecha) y 6.5 (inferior). Elaboración propia.

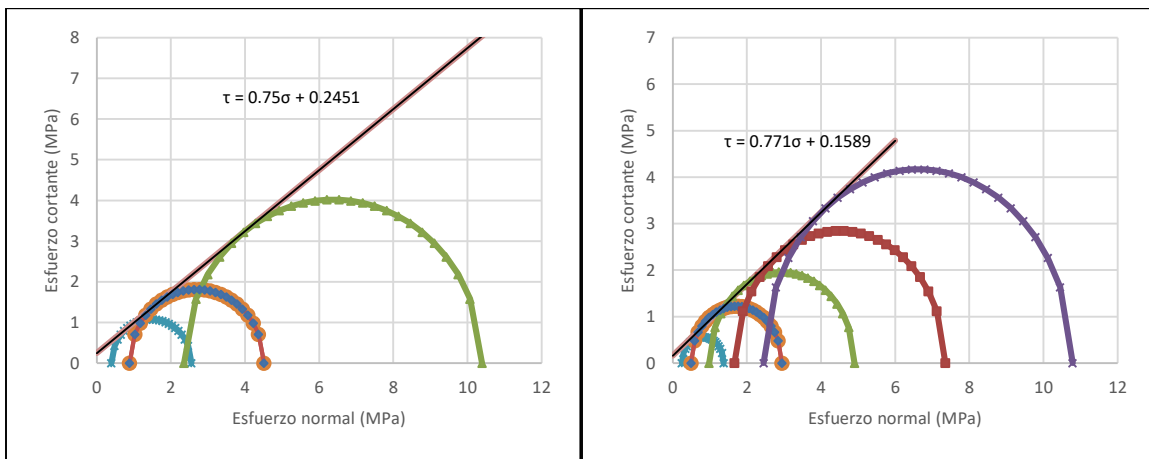




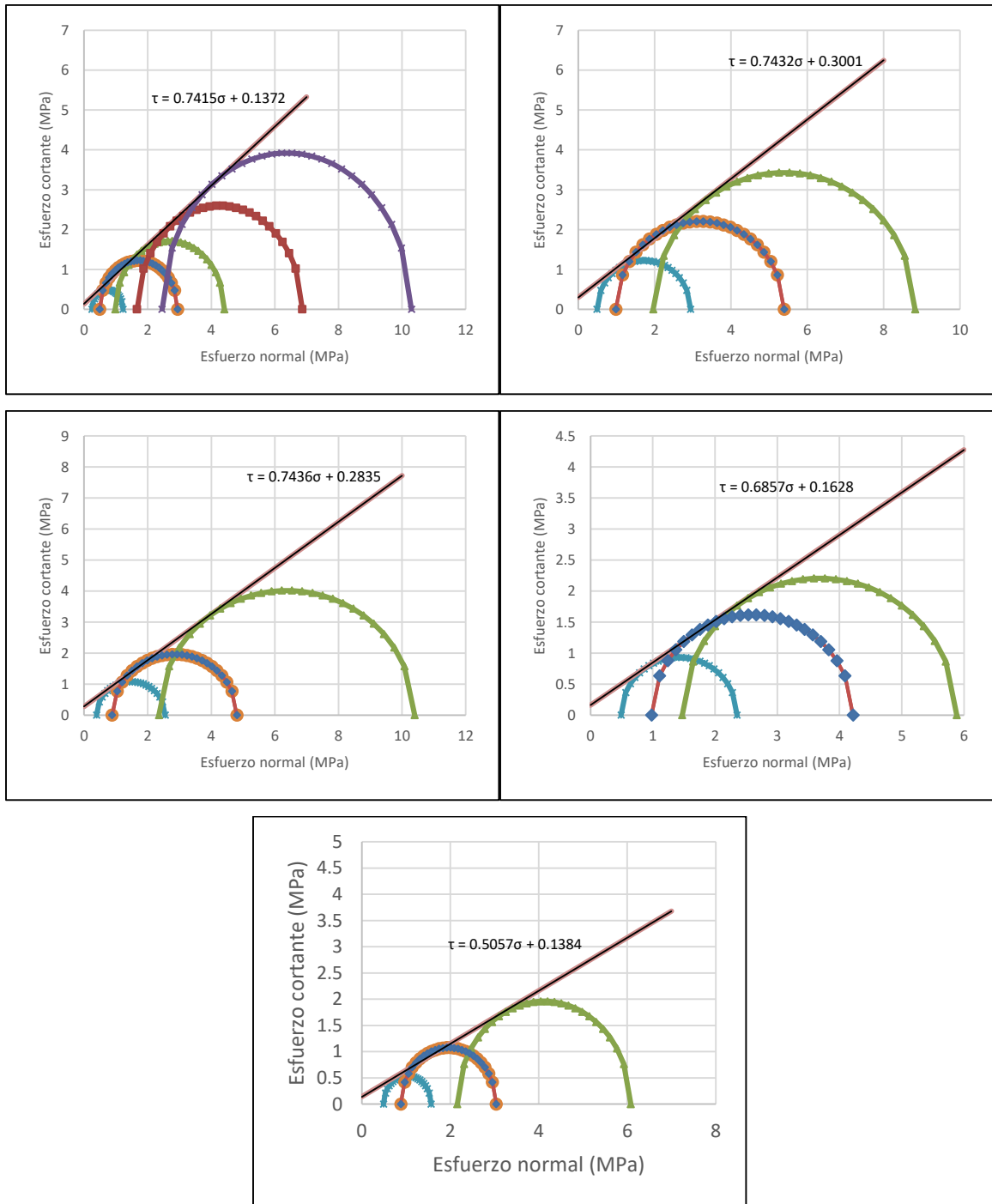
**Figura 4-36.** Envolventes de falla para material 7.1 (superior izquierda), 7.2 (superior derecha), 7.3 (intermedio-superior izquierda), 7.4 (intermedio-superior derecha), 7.5 (intermedio-inferior izquierda), 7.6 (intermedio-inferior derecha) y 7.7 (inferior). Elaboración propia.



**Figura 4-37.** Envolvente de falla para material 8.1 (superior izquierda), 8.2 (superior derecha), 8.3 (inferior izquierda) y 8.4 (inferior derecha). Elaboración propia.







**Figura 4-38.** Envolvente de falla para material 9.1 (superior izquierda), 9.2 (superior derecha), 9.3 (intermedio-superior izquierda), 9.4 (intermedio-superior derecha), 9.5 (intermedio-inferior izquierda), 9.6 (intermedio-inferior derecha) y 9.7 (inferior). Elaboración propia.

De los resultados se evidencia gran variabilidad de la resistencia. Por ejemplo, los valores de cohesión efectiva  $c'$  varían entre 3 kPa y 355 kPa, con un promedio de 116 kPa. Por otro lado, el ángulo de fricción efectivo  $\phi'$  oscilan entre 19° y 46°, con una media de 33°. Este último valor es congruente con los rangos típicos para materiales granulares, en donde la fricción es un factor preponderante en la resistencia. En la Tabla 4-5 se presenta un resumen de los parámetros obtenidos.

**Tabla 4-5.** Parámetros de resistencia  $c'$  y  $\phi'$  de los materiales estudiados.

Código granulometría	Parámetros de resistencia		Código granulometría	Parámetros de resistencia	
	$\phi'$ (°)	$c'$ (kPa)		$\phi'$ (°)	$c'$ (kPa)
1.1.	36	60	6.4	32	28
1.2.	37	41	6.5	34	36
2.1.	46	98	7.1	27	124
2.2.	43	36	7.2	29	84
2.3	41	92	7.3	24	134
2.4	36	100	7.4	23	105
3.1.	40	29	7.5	29	123
3.2	36	113	7.6	32	105
4.1	32	90	7.7	34	3
4.2	19	355	8.1	37	156
4.3	28	208	8.2	36	164
4.4	29	91	8.3	36	142
5.1	32	108	8.4	35	92
5.2	32	110	9.1	37	245
5.3	32	99	9.2	38	159
5.4	38	61	9.3	37	137
5.5	42	55	9.4	37	300
6.1	23	68	9.5	37	284
6.2	28	39	9.6	34	163
6.3	27	59	9.7	27	138

## 4.5 Relación entre la proporción volumétrica de bloques (VBP) y la resistencia

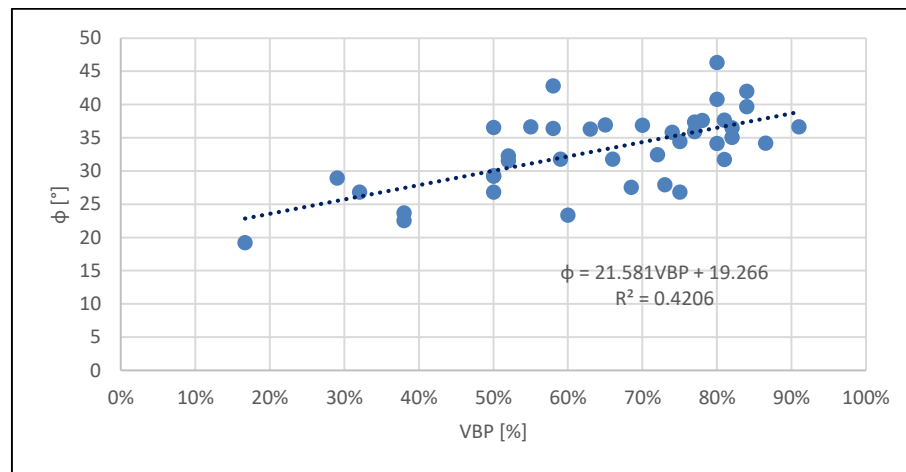
Tras haber obtenido el límite que separa los bloques de la matriz por diferentes metodologías (ver capítulo 2.2.2), y posteriormente hallado la proporción volumétrica de

bloques *VBP* (ver capítulo 2.2.3), se procedió a determinar los parámetros efectivos de resistencia al corte ( $c'$  y  $\phi'$ ) de los materiales utilizados.

A continuación se relacionan los parámetros de resistencia con la *VBP*, el cual, de nuevo, es una de las propiedades que se ha encontrado, tiene mayor efecto en la resistencia al corte de los *bims* (ver sección 2.2.4).

#### 4.5.1 Relación entre la proporción volumétrica de bloques (VBP) y el ángulo de fricción efectivo $\phi'$

Los resultados de la presente investigación evidencian que hay una relación importante en el ángulo de fricción de los *bims*, y la cantidad de bloques presentes. Se encontró que, a mayor número de bloques, el ángulo de fricción del material incrementaba. Los resultados varían de acuerdo a la metodología implementada.



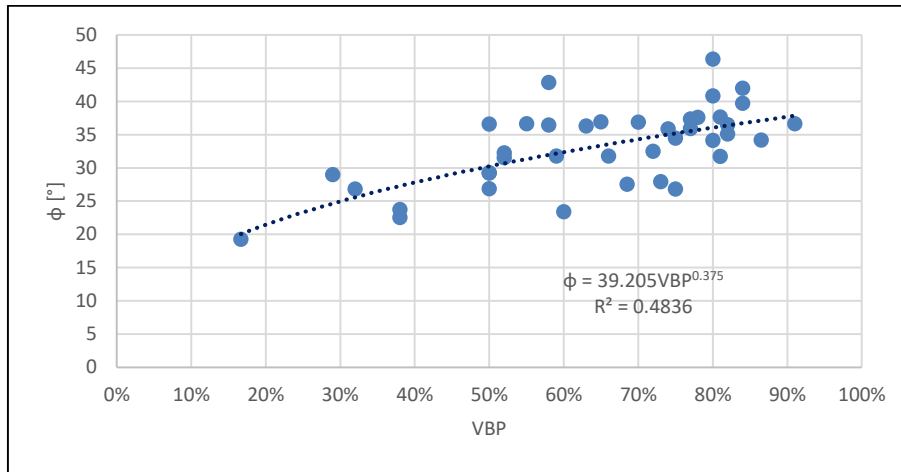
**Figura 4-39.** Correlación lineal entre el ángulo de fricción  $\phi'$  y la *VBP* hallada por el método de Nanclares.

Elaboración propia.

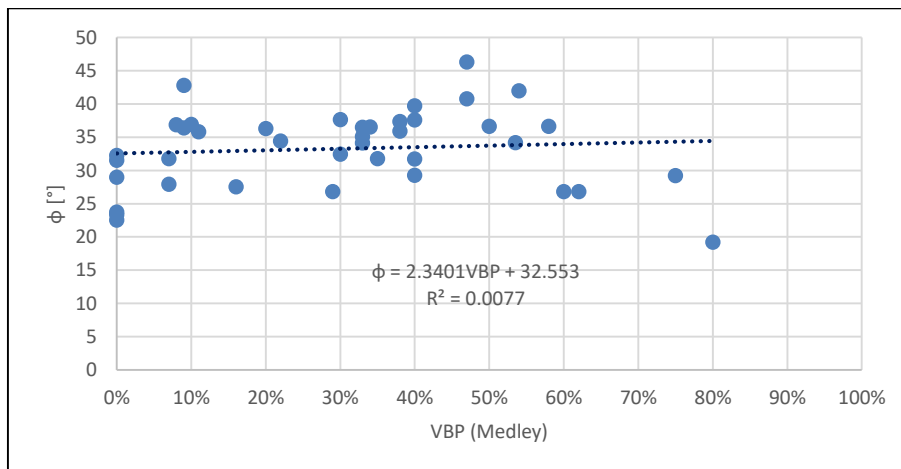
Por ejemplo, al relacionar la *VBP* hallada por el método de (Nanclares, 2018), y el ángulo de fricción  $\phi'$ , se encontraron mejores resultados, según el coeficiente de determinación, que los obtenidos de acuerdo a la propuesta de (Medley E. , 1994). Con el primer método se obtuvo una tendencia lineal y potencial con un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0,42

(Ver Figura 4-39) y 0,48, (Ver Figura 4-40) respectivamente. Para el segundo método se logró una tendencia lineal, con un  $R^2$  de 0,007 (Ver Figura 4-41).

Es importante mencionar que el  $R^2$  es un coeficiente que oscila entre 0 y 1; donde 0 indica que las variables no se relacionan o el modelo propuesto no se ajusta, y 1 es sinónimo de un ajuste perfecto. Dada la variabilidad existente en el campo de la geotecnia, un  $R^2$  superior a 0,4 es un buen indicativo de la calidad de la tendencia propuesta.



**Figura 4-40.** Correlación potencial entre el ángulo de fricción  $\phi'$  y la VBP hallada por el método de Nanclares.  
Elaboración propia.



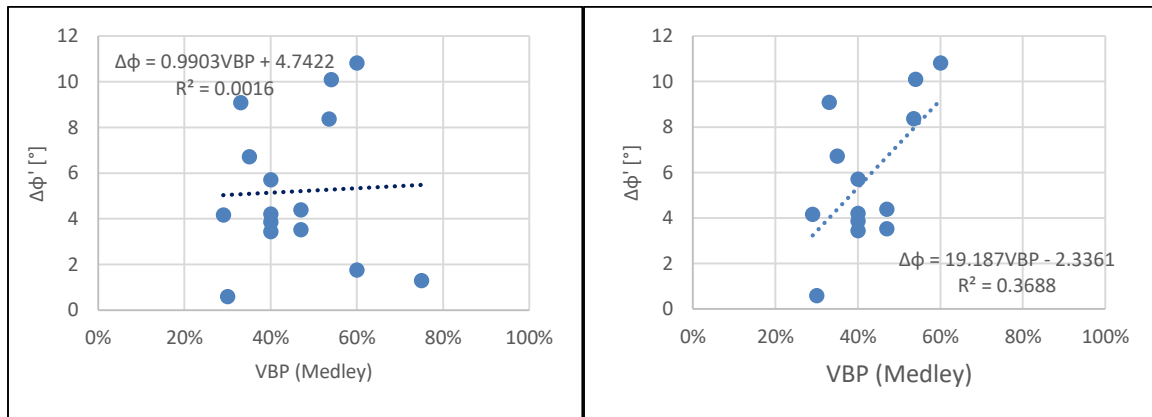
**Figura 4-41.** Correlación potencial entre el ángulo de fricción  $\phi'$  y la VBP hallada por el método de Medley.  
Elaboración propia.

De acuerdo con lo anterior, inicialmente se evidencia que, a través de la metodología de Nanclares, se puede llegar a un resultado más cercano al verdadero, demostrando que existe una correlación entre el ángulo de fricción  $\varphi'$  y la  $VBP$ , tanto lineal como potencial, evidenciando mejores resultados en la tendencia potencial. De manera contraria, el método de Medley en un principio no arroja correlación alguna entre las variables analizadas, por lo que la tendencia propuesta no es confiable.

Sin embargo, al tratar un poco más los datos encontrados por el método de Medley, se evidencia que, si se normalizan los datos usando los valores de la matriz como base, se obtienen mejores resultados. Para ello se siguieron los hallazgos de (Lindquist & Goodman, 1994) y (Irfan & Tang, 1993), los cuales se presentan en el capítulo 2.2.4.

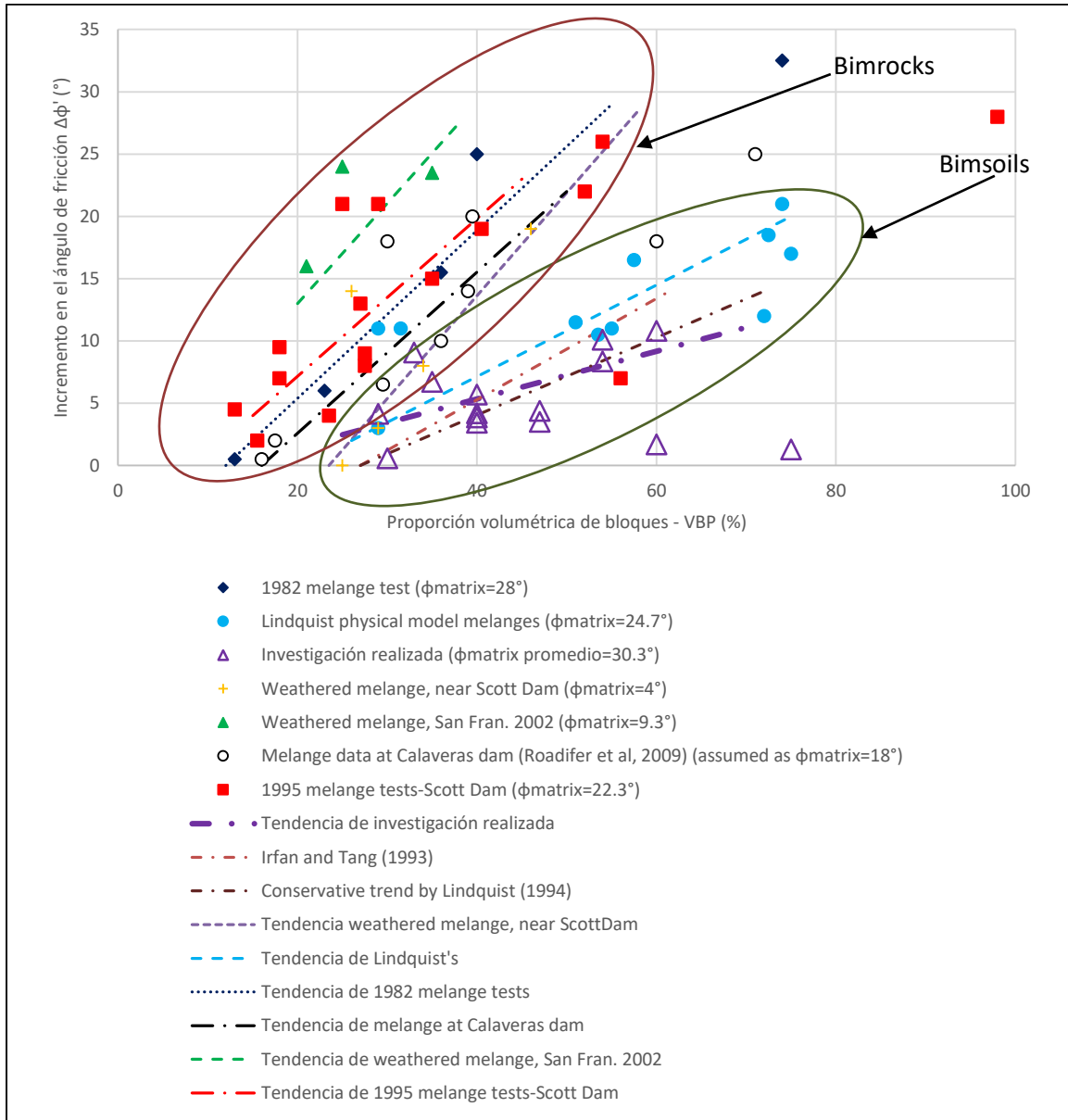
De acuerdo con los investigadores, para proporciones de bloque por debajo del 25%, el efecto de estos en la resistencia es mínimo. De acuerdo con lo anterior, los parámetros de resistencia al corte de muestras con una  $VBP$  menor al 25% se pueden considerar que son los de la matriz. Así, se pudo hallar el incremento en el ángulo de fricción  $\Delta\varphi$  de los *bims* a partir de la siguiente expresión:

$$\Delta\varphi = \varphi_{bims} - \varphi_{matriz} \quad (16)$$



**Figura 4-42.** Correlación lineal entre el incremento del ángulo de fricción  $\Delta\varphi'$  y la  $VBP$  hallada por el método de Medley – Datos crudos (derecha) y eliminando dos valores extremos (izquierda).  
Elaboración propia.

Con esos valores se construyó una gráfica que relacionara el  $\Delta\phi$  con la VBP. Inicialmente se obtuvieron 15 parejas de datos, los cuales a simple vista no tienen ninguna correlación ( $R^2 = 0,0016$ ). Sin embargo, si se descartan dos valores extremos, el coeficiente de determinación  $R^2$  incrementa sustancialmente a 0,37. Los resultados se presentan en la Figura 4-42.



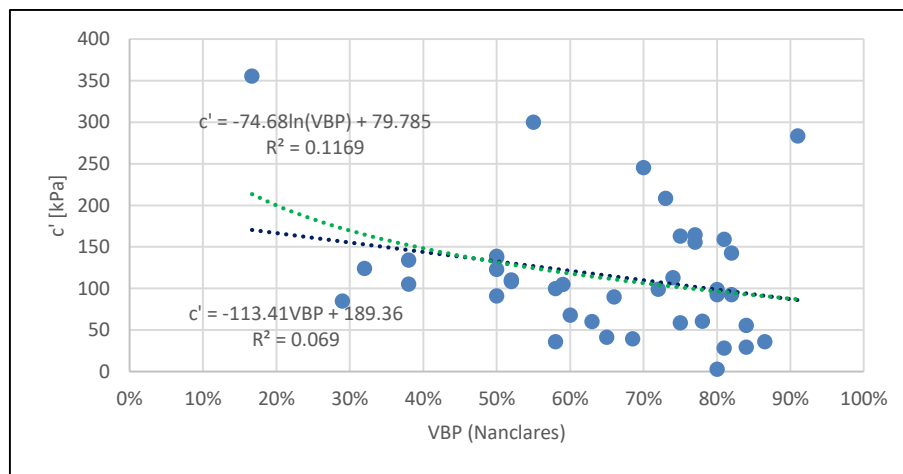
**Figura 4-43.** Comparación de la correlación lineal entre el incremento del ángulo de fricción  $\Delta\phi'$  y la VBP hallada por el método de Medley, y tendencias de otros autores. Elaboración propia.



Si se estudia con detalle la descripción del tipo de material, se encuentra que el primer grupo está compuesto por *bimrocks*, es decir, la matriz es soldada. En el segundo conjunto, los materiales son *bimsoils*, es decir, la matriz no está soldada, correspondiendo a suelo.

Por otro lado, al enfocarse en el material objeto de estudio de esta investigación (*bimsoils*), se observa que, al conjugar los datos obtenidos por Lindquist y los de este trabajo, se puede hallar una tendencia más robusta. Así, para proporciones de bloques bajas, esta investigación arroja valores más cercanos a las tendencias halladas; mientras que para *VBP* mayores, los datos de Lindquist se acoplan mejor. Los resultados de este híbrido se presentan en la Figura 4-44.

#### 4.5.2 Relación entre la proporción volumétrica de bloques (*VBP*) y la cohesión efectiva $c'$

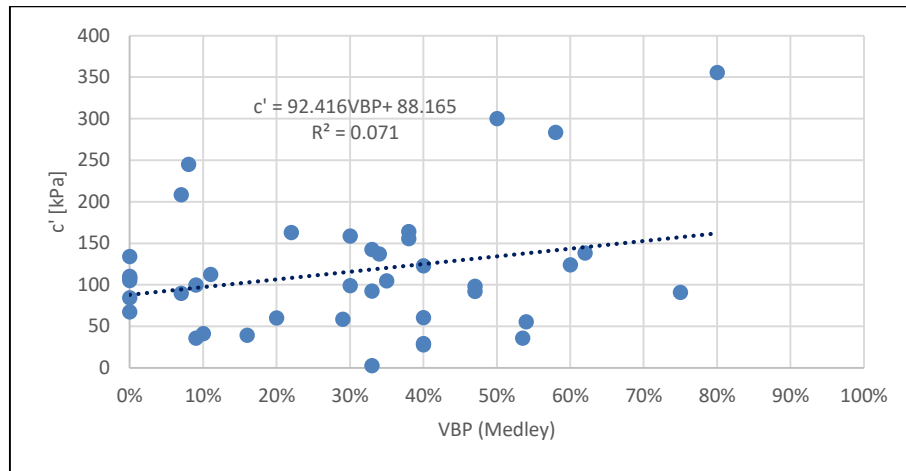


**Figura 4-45.** Correlación lineal y logarítmica entre la cohesión  $c'$  y la *VBP* hallada por el método de Nanclares.  
Elaboración propia.

De manera análoga al procedimiento seguido con el ángulo de fricción  $\phi'$ , y que se presenta en el sección anterior (Ver 4.5.1), se procedió a relacionar la cohesión  $c'$  con la proporción de bloques *VBP*. La comparación se hizo usando tanto la metodología de (Nanclares, 2018), como la de (Medley E. , 1994).



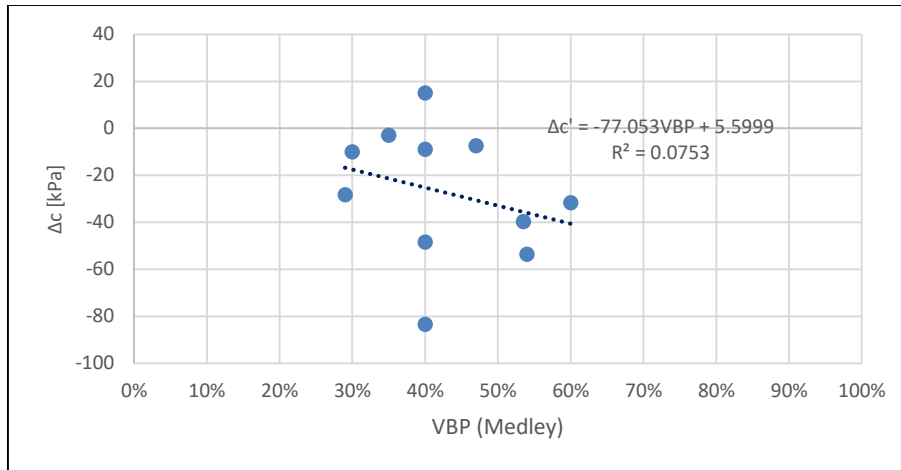
Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 4-45 a Figura 4-47. En todos los casos no se encontró correlación entre las variables analizadas. Haciendo uso de la metodología de Nanclares, se encontró un  $R^2$  igual a 0,0069 y 0,01169 para las tendencias lineal y logarítmica, respectivamente. Para el método de Medley, los resultados fueron similares, obteniendo un  $R^2$  igual a 0,071.



**Figura 4-46.** Correlación lineal entre la cohesión  $c'$  y la VBP hallada por el método de Medley.  
Elaboración propia.

Debido a la pobre correlación hallada, se procedió a encontrar el aumento de la cohesión respecto a la matriz  $\Delta c'$ , procediendo de manera similar a como se hizo con el ángulo de fricción  $\varphi'$ . Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 4-47. De nuevo la correlación, dada por un  $R^2 = 0,0753$ , arroja un resultado pobre, por lo que no se encontró relación entre las variables analizadas.

Una posible razón para que no se encuentre relación alguna entre  $c'$  y VBP, es el hecho de que la cohesión es un parámetro que se encuentra controlado por la fracción fina, y depende en gran medida de la actividad y fuerzas electromagnéticas de los suelos. De acuerdo con lo anterior, la matriz es la que controla este parámetro, el cual, de acuerdo con los resultados obtenidos, no se ve influenciado por la fracción gruesa o la cantidad de bloques que tenga la geomasa.

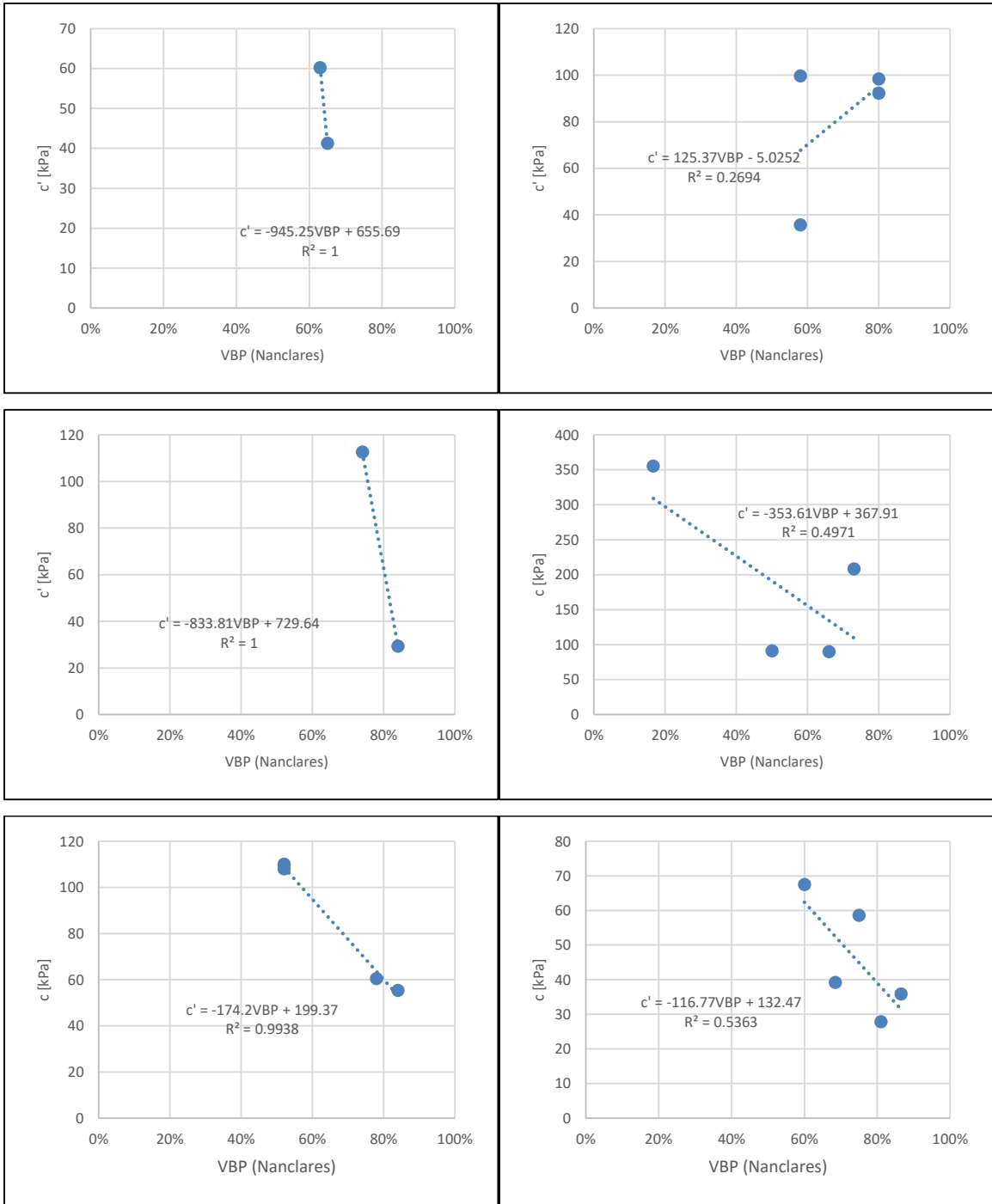


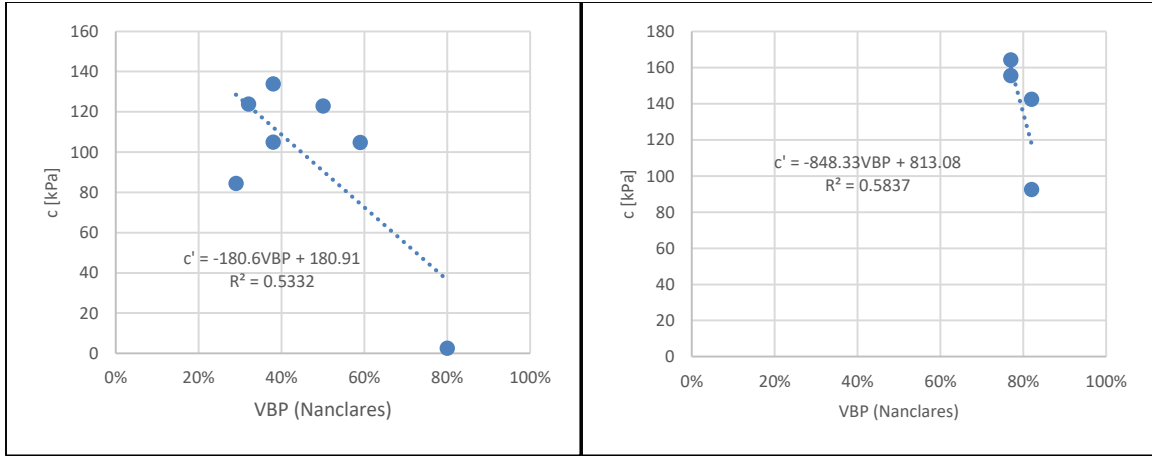
**Figura 4-47.** Correlación lineal entre el incremento de la cohesión  $c'$  y la VBP hallada por el método de Medley.  
Elaboración propia.

Sin embargo y a pesar de que no se obtuvieron buenas correlaciones, se observa que en general la tendencia observada en la Figura 4-45 (metodología de Nanclares) y la Figura 4-47 (metodología de Medley, normalizada respecto a la resistencia de la matriz) es decreciente, lo cual indica que en la medida que aumenta la cantidad de bloques, la cohesión tiende a disminuir. Esto se puede explicar debido a que, en la medida que la fracción gruesa incrementa, esta empieza a regir sobre la resistencia; mientras que la fracción fina pierde influencia dentro de la resistencia de todo el conjunto. Lo anterior respalda lo presentado por autores como (Lindquist E. S., 1994), (Kalender, Sonmez, Medley, Tunusluoglu, & Kasapoglu, 2014), entre otros.

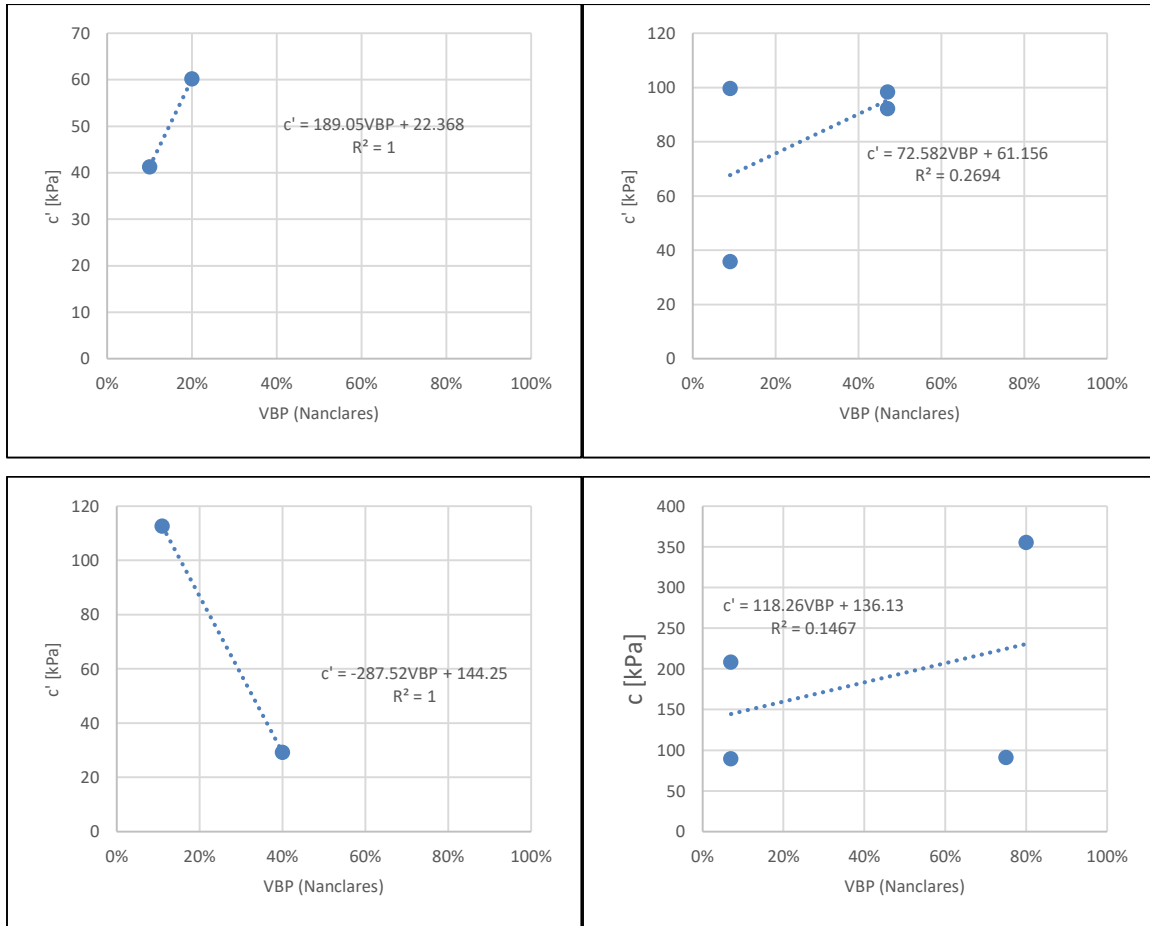
Para respaldar lo afirmado, se procedió a hacer una gráfica de  $c'$  vs  $VBP$  para cada material estudiado. Lo anterior se hizo buscando eliminar el efecto de las diferencias que se puedan encontrar entre los suelos que conforman la matriz en cada material estudiado. Así, se puede tener mayor grado de certeza de que la principal variable será el contenido de bloques, y no las diferencias en el material que conforma la fracción fina. Los resultados se presentan en la Figura 4-48 y Figura 4-49.

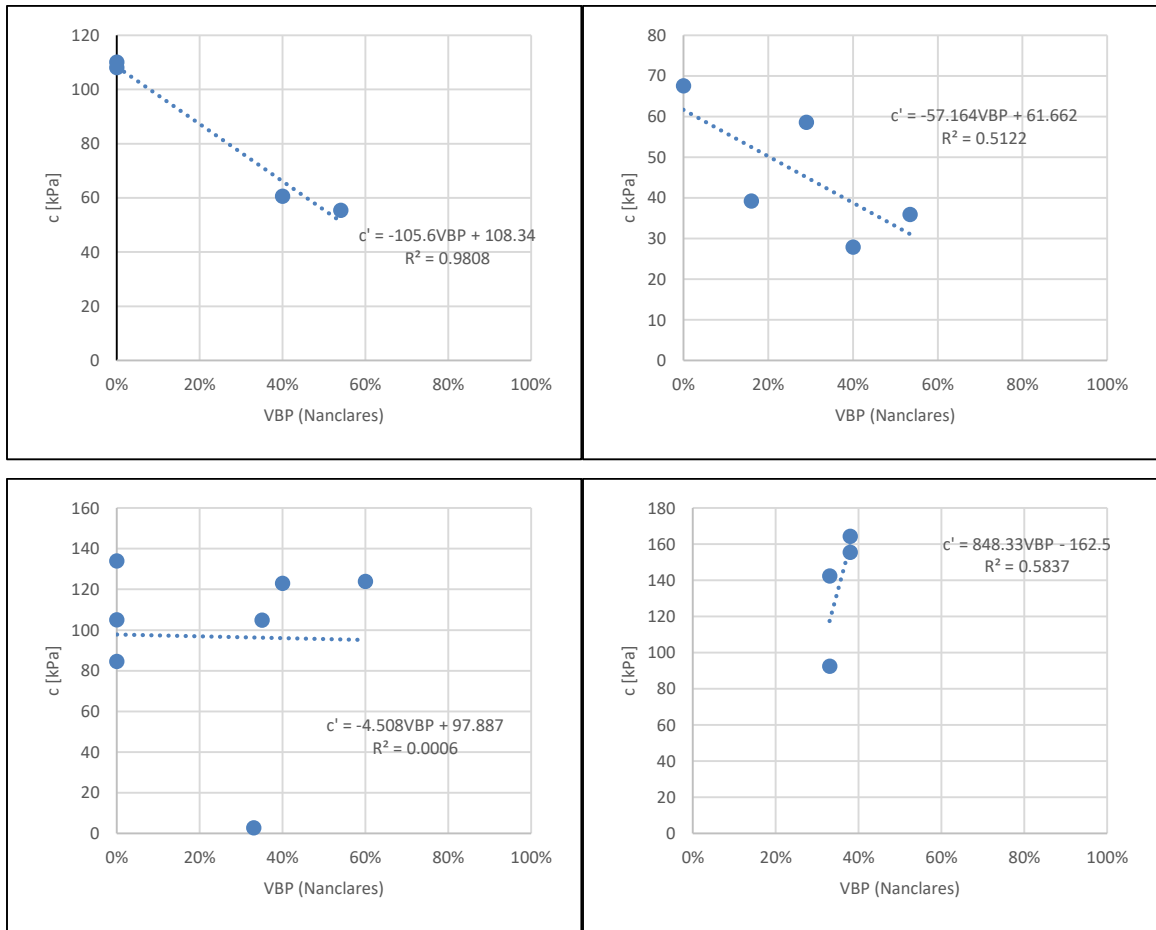
Se descartó el material obtenido de la fuente 9 debido a que cada muestra tiene un origen diferente, por lo que no se cumplía el objetivo de graficar cada material, el cual era eliminar la variabilidad de los suelos que conformaban la matriz.





**Figura 4-48.** Correlación lineal entre la cohesión  $c'$  y la VBP hallada por el método de Nanclares, para material 1 (superior izquierda), 2 (superior derecha), 3 (intermedio-superior izquierda), 4 (intermedio-superior derecha), 5 (intermedio-inferior izquierda), 6 (intermedio-inferior derecha), 7 (inferior izquierda) y 8 (inferior derecha).  
Elaboración propia.





**Figura 4-49.** Correlación lineal entre la cohesión  $c'$  y la VBP hallada por el método de Medley, para material 1 (superior izquierda), 2 (superior derecha), 3 (intermedio-superior izquierda), 4 (intermedio-superior derecha), 5 (intermedio-inferior izquierda), 6 (intermedio-inferior derecha), 7 (inferior izquierda) y 8 (inferior derecha).  
Elaboración propia.

Los resultados de la Figura 4-48 (metodología de Nanclares), muestran que, al graficar cada fuente de material por separado, los resultados evidencian una mayor correlación entre las variables. Los valores de  $R^2$  para los materiales con tendencia decreciente, oscilaron entre 0,4971 y 0,9938, con un  $R^2$  promedio de 0,63 y una desviación estándar de 0,21. En este rango no se incluyen los gráficos en donde solo se tenían dos datos, casos en los que el  $R^2$  es igual a 1,0.

Se observa que en siete (7) de los ocho (8) gráficas construidas; es decir, en el 87,5% de los materiales analizados, se tuvo una tendencia decreciente. Lo anterior corrobora lo mencionado en párrafos preliminares, en donde en la medida que se incrementa la fracción

gruesa (bloques), la fracción fina (matriz) deja de aportar a la resistencia. Dado que la matriz está íntimamente ligada a la cohesión, si la  $VBP$  aumenta,  $c'$  disminuye.

Por otro lado, los resultados obtenidos por la metodología de Medley (Ver Figura 4-49), fueron más erráticos. La mitad (50%) presentaron una tendencia creciente y la otra mitad (50%) decreciente. Los valores de  $R^2$  oscilaron entre 0,4971 y 0,9938, con un  $R^2$  promedio de 0,44 y una desviación estándar de 0,39. Una posible explicación para estos resultados puede encontrarse al revisar los valores obtenidos en el sección anterior; en donde la metodología de Medley solo arrojó valores adecuados al normalizar el ángulo de fricción  $\phi'$  respecto a la matriz.

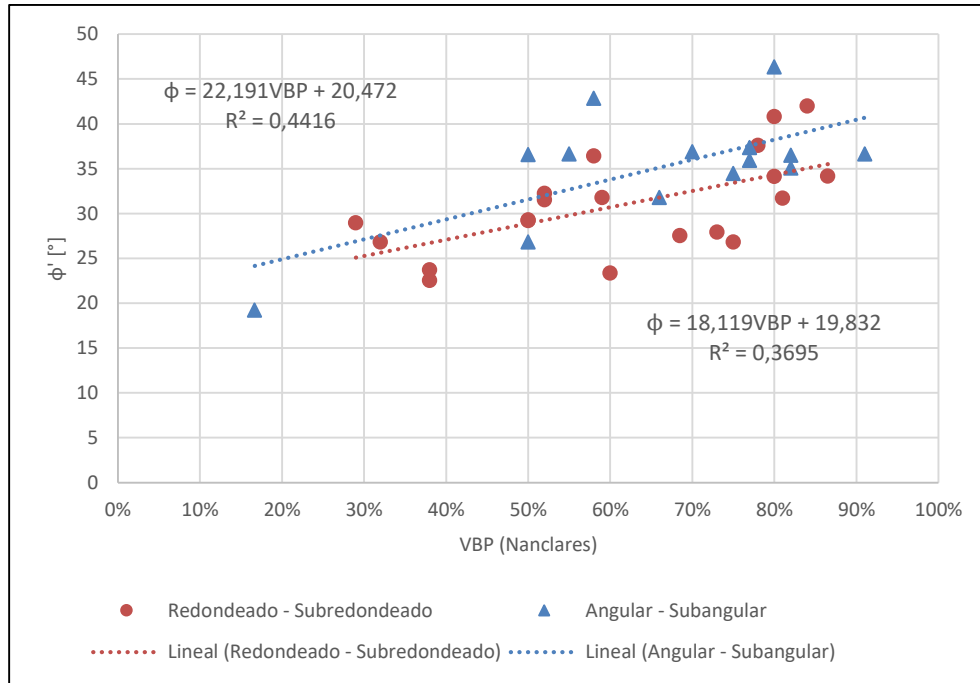
## 4.6 Relación entre la forma de los bloques y la resistencia

Adicional a estudiar el efecto de la cantidad de bloques en la resistencia al corte de los *bims*, se buscó identificar si existe o no un efecto de la forma de los bloques en la resistencia. Para ello, se clasificaron los datos y se agruparon en dos conjuntos; aquellos cuya forma es angular o subangular (triángulos azules), y los de forma redondeada o subredondeada (círculos rojos).

Los datos se graficaron relacionando la proporción de bloques  $VBP$  obtenida por el método de Nanclares, con el ángulo de fricción  $\phi'$ . Se hizo uso de esta metodología porque fue la que arrojó una mejor correlación. Para cada grupo, se trazó una línea de tendencia lineal obteniendo un  $R^2$  de 0,44 y 0,37 para los bloques angulares/subangulares y los redondeados/subredondeados, respectivamente. Los resultados se presentan en la Figura 4-50. De ella, se observa que los bloques angulares tienen, en general, un mayor ángulo de fricción, en comparación con los bloques redondeados. En promedio, el  $\phi'$  de los bloques angulares es de 35,3°; mientras que el de los bloques redondeados es de 31,3°.

En la Figura 4-50 se observa también que el efecto de la forma es más importante en la medida que aumenta la proporción de bloques. Esto se ve reflejado por las regresiones lineales, las cuales tienden a alejarse conforme  $VBP$  aumenta; es decir, en la medida que la proporción de bloques es mayor, la diferencia entre el ángulo de fricción  $\phi'$  para bloques redondeados y angulares incrementa. Lo anterior es congruente con lo encontrado por

otros autores; en donde (Kalender, Sonmez, Medley, Tunusluoglu, & Kasapoglu, 2014) afirma que por encima del 60% la cantidad de bloques es tal que se presentan contactos entre ellos; por lo que la resistencia del *bim* se ve afectada por la redondez del bloque, el grado de trabazón entre bloques y el esfuerzo normal de confinamiento (Ver sección 2.2.4).



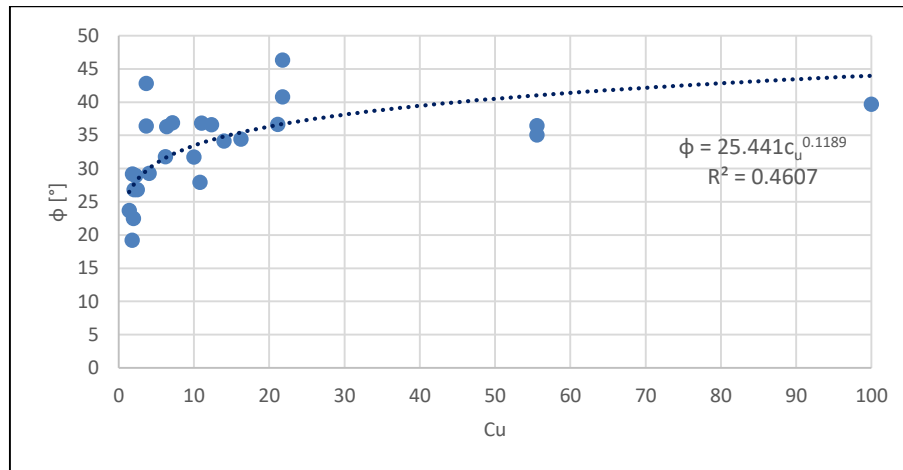
**Figura 4-50.** Correlación lineal entre el ángulo de fricción  $\phi'$  y la VBP hallada por el método de Nanclares, para diferentes formas de bloques. Elaboración propia.

Al realizar un ejercicio numérico se puede visualizar mejor el efecto de la forma de los bloques en el incremento en el ángulo de fricción de los *bims*. Por ejemplo, al tomar un *VBP* del 10%, y reemplazarla en las ecuaciones de tendencia halladas se obtiene un  $\phi'$  de 22,69° y 21,64° para los bloques angulares y redondeados, respectivamente. Es decir, el ángulo de fricción  $\phi'$  mejora un 4,84% debido a la forma de los bloques. Sin embargo, al tomar un *VBP* del 60%, se obtiene un  $\phi'$  de 35,79° y 30,70° para los bloques angulares y redondeados, respectivamente. En este caso, el incremento de  $\phi'$  es de un 16,55%; es decir, el efecto de la forma de los bloques en la fricción de los *bims* se potencia con una mayor cantidad de bloques. Si comparamos la mejoría para una *VBP* de 10% y 60%, se observa un aumento del 3,4% en los incrementos de  $\phi'$ .

Se propone para futuras investigaciones complementar la base de datos utilizada y estudiar a través de pruebas estadísticas el efecto de la forma de los bloques, considerando la variabilidad intrínseca del parámetro estudiado.

## 4.7 Relación entre la gradación y la resistencia

Otro de los objetivos de la presente investigación es evaluar el efecto de la gradación en la resistencia al corte de los *bims*. En los antecedentes se mencionó que, de acuerdo a ciertos autores, las muestras gradadas generan una mayor tortuosidad de la superficie de falla, lo que se traduce en un mayor ángulo de fricción de los geomateriales (Ver sección 2.2.4).



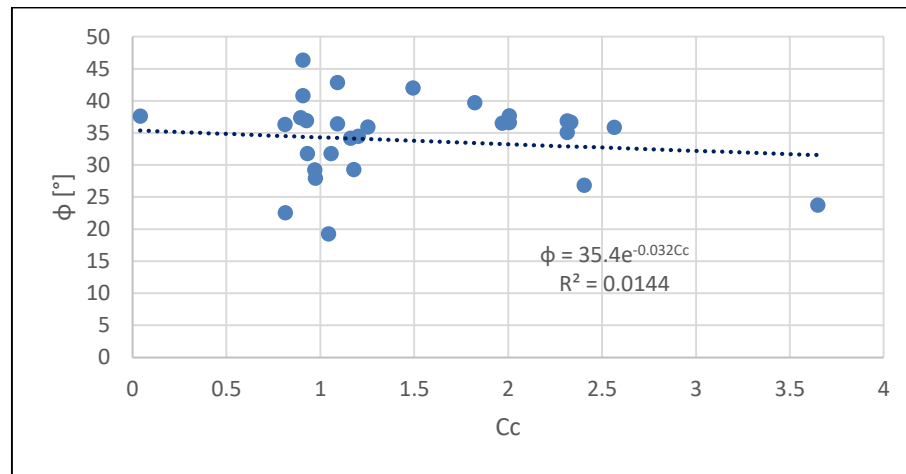
**Figura 4-51.** Correlación potencial entre el ángulo de fricción  $\phi'$  y el  $c_u$ . Se filtraron valores extremos de  $Cu > 100$ .  
Elaboración propia.

En este caso, para hallar la influencia de la gradación en la resistencia, se encontró el coeficiente de uniformidad  $c_u$  y de curvatura  $c_c$  para las muestras ensayadas; y se compararon con los parámetros de resistencia obtenidos. Los resultados muestran que es el ángulo de fricción  $\phi'$  y el coeficiente de uniformidad  $c_u$  se pueden asociar a través de una tendencia potencial, obteniendo un  $R^2$  igual a 0,46 (Ver Figura 4-51).

Al analizar el sentido físico de la tendencia hallada, se encuentra que ésta es congruente con los antecedentes y deducciones obtenidas a partir de otras investigaciones. Lo anterior

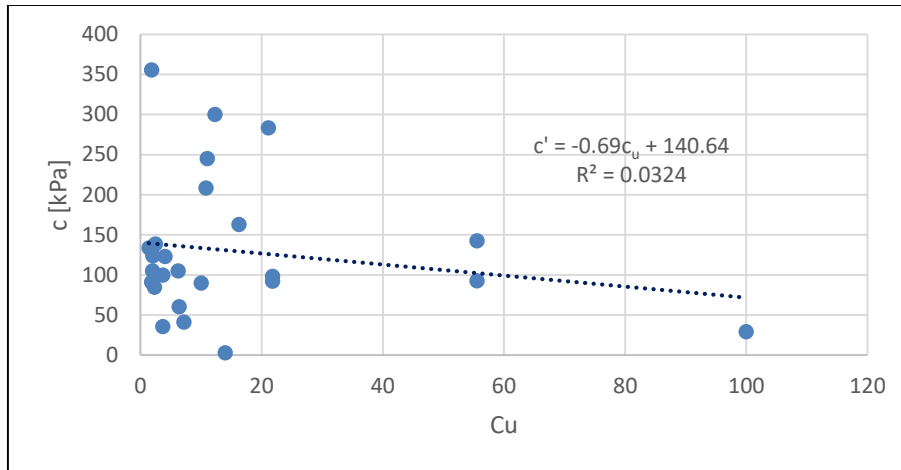


es debido a que, dado que  $c_u$ , es la relación entre  $D_{60}$  y  $D_{10}$ , mientras mayor es  $c_u$ , mayor es el rango de tamaños que abarca la granulometría de la muestra. En otras palabras, cuando  $c_u$  tiende a 1,  $D_{10}$  y  $D_{60}$  tienden a ser iguales y la granulometría se encuentra concentrada en un mismo rango de tamaños, es decir, está bien seleccionada. En el caso contrario, mientras mayor sea  $c_u$ , mayor es la diferencia entre  $D_{10}$  y  $D_{60}$ , por lo que la muestra está mal seleccionada. Así, un incremento en  $c_u$  es indicio de que el material se encuentra bien gradado, por lo cual la muestra contiene un amplio rango de tamaños que provocan que la superficie de falla tenga un mayor recorrido o sea más tortuosa. Todo ello finalmente se ve traducido en un incremento en el ángulo de fricción  $\phi'$ , como lo indica la tendencia propuesta en la Figura 4-51.



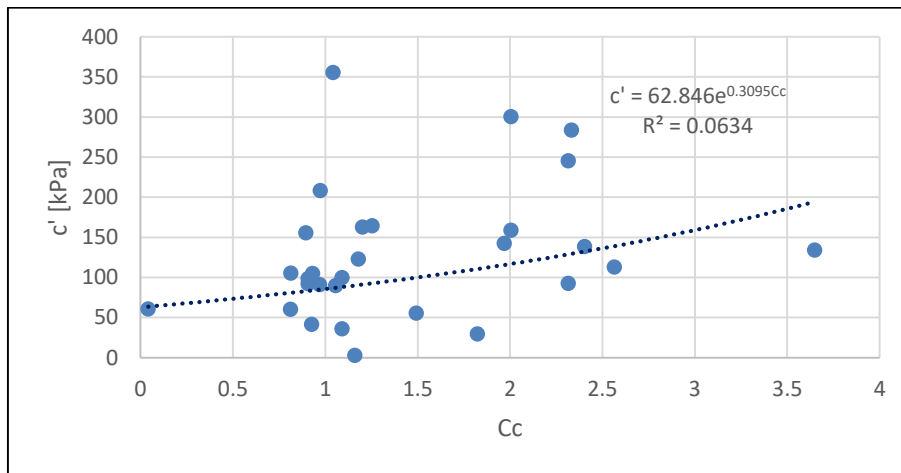
**Figura 4-52.** Correlación potencial entre el ángulo de fricción  $\phi'$  y el  $c_c$ . Se filtraron valores extremos de  $C_c > 6$ . Elaboración propia.

Por otro lado, el coeficiente de curvatura  $c_c$  es el cociente entre el cuadrado de  $D_{30}$  y el producto de  $D_{10}$  y  $D_{60}$ . Este parámetro permite conocer la forma de la curva granulométrica, y da un indicio de si esta tiende a ser una recta o posee curvatura. Este valor también se comparó con el ángulo de fricción  $\phi'$ . Los resultados se presentan en la Figura 4-52 y muestran que no existe correlación entre estas variables, obteniendo un  $R^2$  igual a 0,014.



**Figura 4-53.** Correlación potencial entre la cohesión  $c'$  y el  $c_u$ . Se filtraron valores extremos de  $C_u > 100$ .  
Elaboración propia.

El ejercicio se repitió con la cohesión  $c'$ , comparándola con los coeficientes de uniformidad  $c_u$  y curvatura  $c_c$ . Los resultados tampoco arrojaron correlación entre estas variables, presentando un  $R^2$  de 0,032 (Ver Figura 4-53) y 0,063 (Ver Figura 4-54).



**Figura 4-54.** Correlación potencial entre la cohesión  $c'$  y el  $c_c$ . Se filtraron valores extremos de  $C_c > 6$ .  
Elaboración propia.

## 4.8 Validación de resultados

Como se mencionó en el Capítulo 3, la validación de las correlaciones obtenidas en la presente investigación se hizo a partir de ensayos no convencionales *HCT* in situ. En total se realizaron cinco (5) pruebas en dos (2) sitios distintos; la “Distribuidora de Envigado” y la finca “Las Mercedes”. A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

### 4.8.1 Realización de ensayo in situ HCT

Tras la selección de los sitios de estudio, se llevó a cabo el ensayo HCT siguiendo el procedimiento descrito en la sección 3.5. De acuerdo a este, el ensayo tiene dos fases, una en campo en donde se realiza la adquisición de datos esfuerzo-desplazamiento. Posteriormente, en oficina se obtuvo los parámetros de resistencia a partir de la calibración de las curvas obtenidas en campo. Los resultados se presentan a continuación:

- **Distribuidora de Envigado**



**Figura 4-55.** Trincheras excavadas para ensayo en Distribuidora de Envigado.

Elaboración propia.

En este sitio se ejecutaron tres (3) de las cinco (5) pruebas realizadas. Inicialmente se excavó una trinchera de 5,0 m de largo, 0,8 m de ancho y 0,8 m de profundidad, en donde,

inicialmente se buscaba realizar la prueba en un depósito aluvial, pero al excavar la trinchera, se pudo identificar un material correspondiente a lleno antrópico con bloques tanto redondeados como angulares. Estos variaban desde tamaño grava ( $5\text{ mm}$ ) hasta los  $10 - 15\text{ cm}$  de diámetro. En cuanto a la matriz, se identificó una textura predominantemente arenosa. En el capítulo 4.8.2 se describe con detalle el material estudiado. En la Figura 4-55 y Figura 4-56 se presenta un registro del material y de las pruebas ejecutadas.

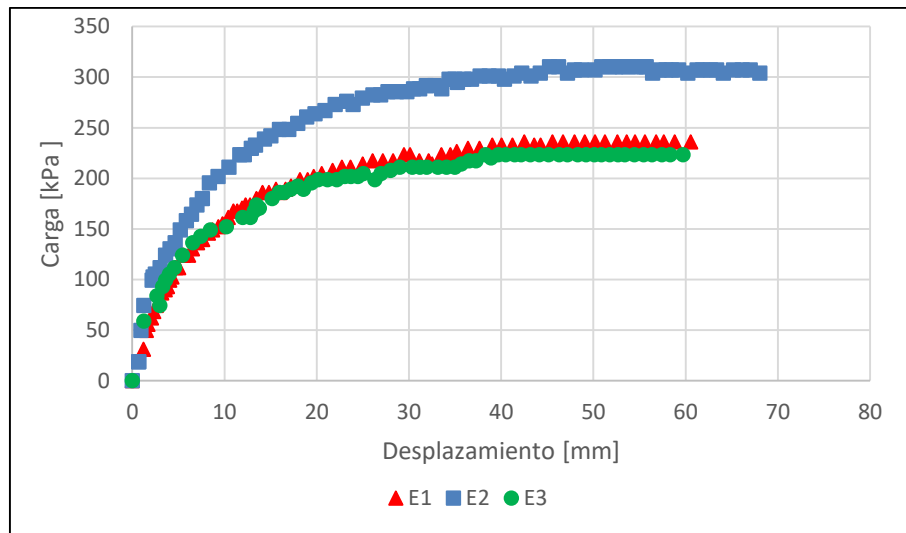


**Figura 4-56.** Material típico encontrado en Distribuidora de Envigado.

Elaboración propia.

Inicialmente se hizo la toma de datos de esfuerzo-desplazamiento. Las curvas obtenidas se presentan en la Figura 4-57. Se evidencia que el material que alcanzó la máxima resistencia corresponde al Ensayo 2 (E2), con un  $q_u$  igual a  $310\text{ kPa}$ . Entre tanto, los Ensayos 1 (E1) y 3 (E3) presentaron un comportamiento muy similar, con un valor de  $q_u$  igual a  $236\text{ kPa}$  y  $224\text{ kPa}$ , respectivamente.





**Figura 4-57.** Curvas Esfuerzo-Desplazamiento obtenidas en Distribuidora de Envigado. Elaboración propia.



**Figura 4-58.** Evidencia de la tortuosidad de la superficie de falla – E1 – Distribuidora de Envigado. Elaboración propia.

En la Figura 4-58, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Figura 4-59 se presenta el registro fotográfico de cada punto analizado. De los resultados se destacan dos hechos importantes. Por un lado, se corrobora uno de los principios de los *bims*, y es que los bloques generan una tortuosidad en la superficie de falla, la cual se ve reflejada en un incremento en la resistencia al corte (Ver Figura 4-58).



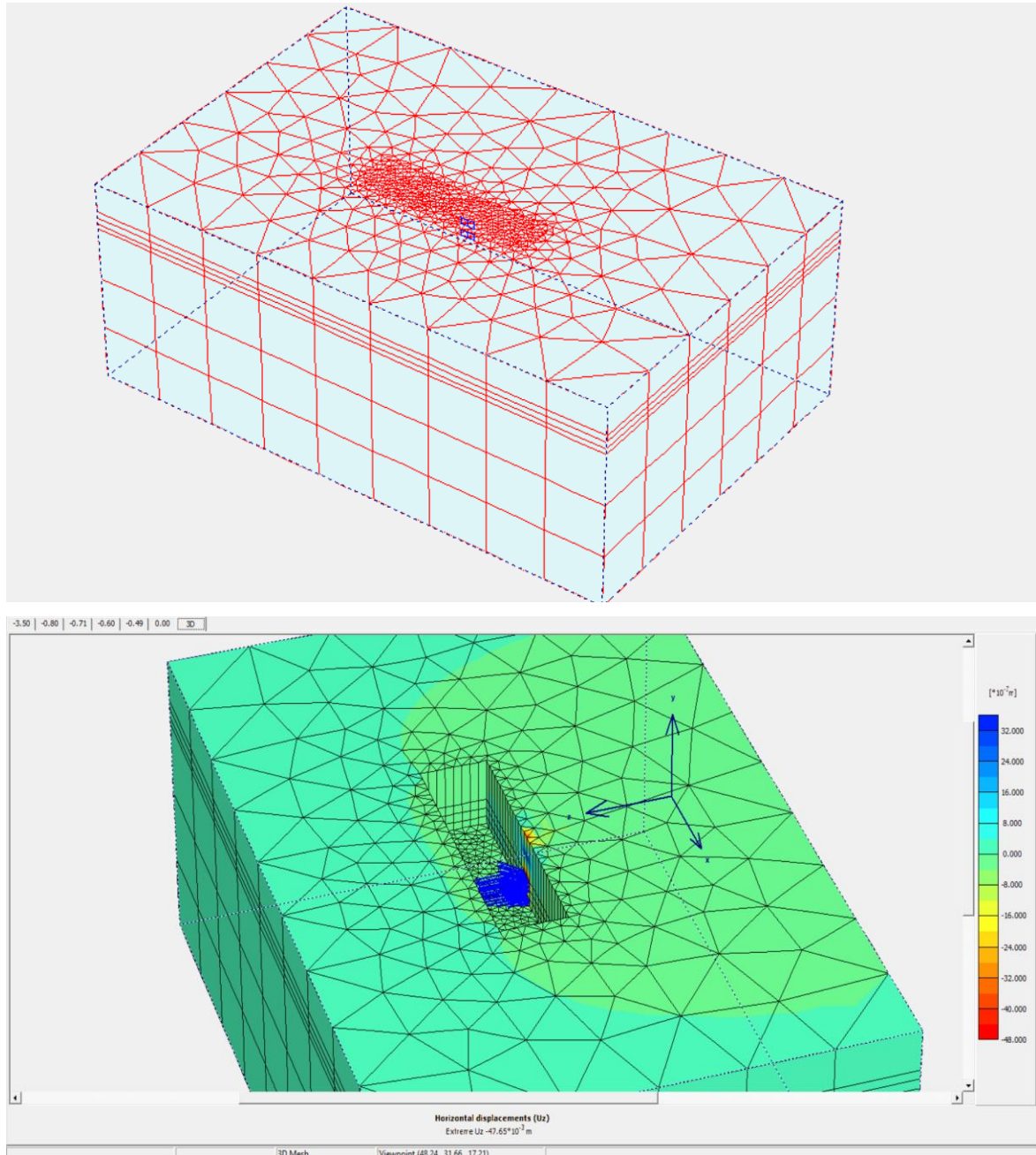
**Figura 4-59.** Evidencia fotográfica ensayo E2 (izquierda) y E3 (derecha) – Distribuidora de Envigado.  
Elaboración propia.

Posteriormente, tras obtener las curvas Esfuerzo-Desplazamiento, se procedió a determinar los parámetros de resistencia al corte del depósito antrópico. Para ello, se utilizó el software Plaxis 3D Foundation (Plaxis B.V., 2004).

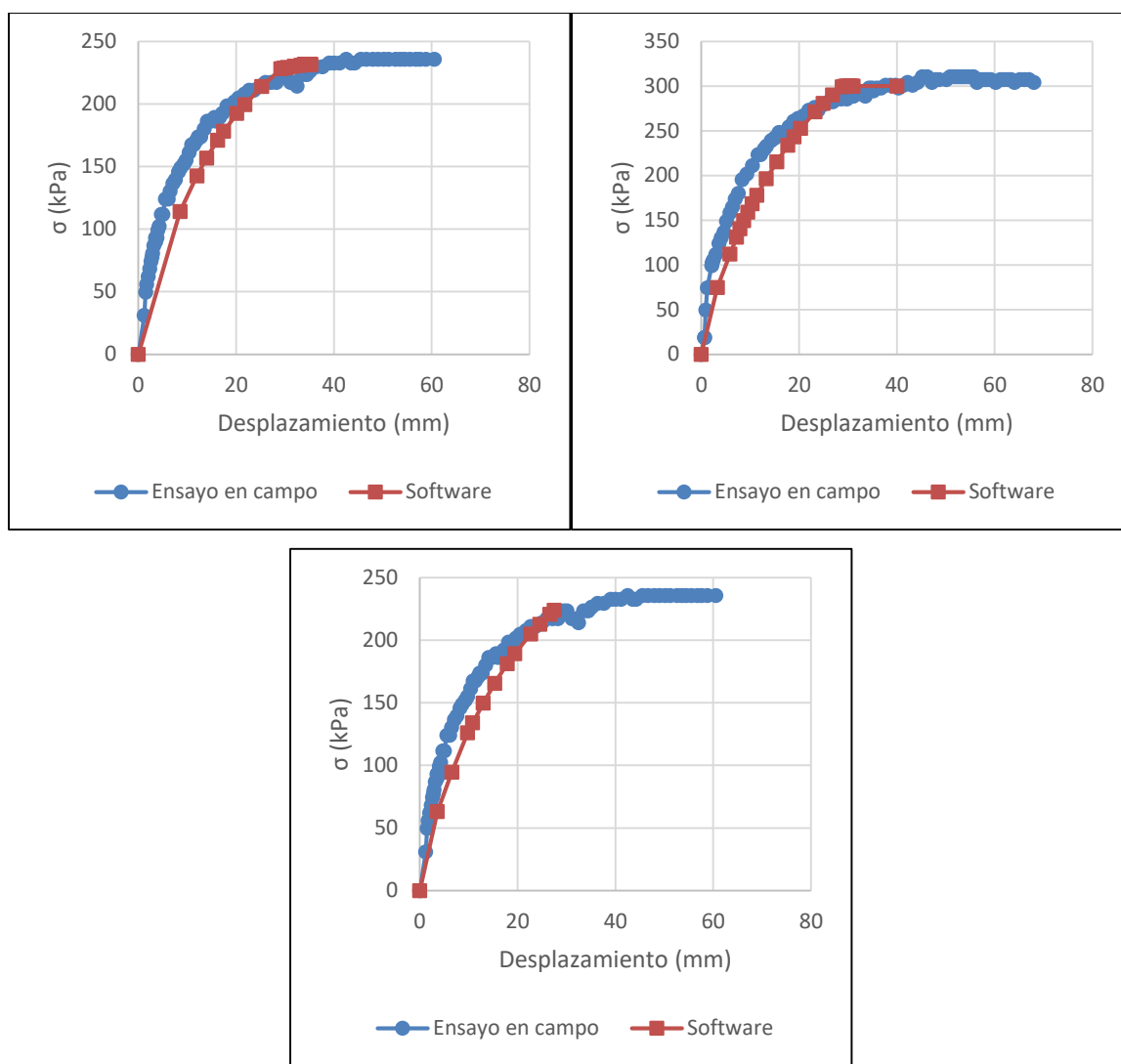
El procedimiento consistió en modelar las condiciones del ensayo (geometría de la excavación, magnitud de la carga aplicada, entre otros), y variar los parámetros de resistencia hasta que la curva obtenida en campo y la arrojada por el software fueran coincidentes.

En la Figura 4-60 se presentan las condiciones iniciales del modelo (geometría, densidad de la malla, etc.). En la Figura 4-61 se presentan los resultados de la calibración de las curvas obtenidas de las mediciones en campo, y las generadas por el software.

Finalmente, en la Tabla 4-5 se presentan los parámetros determinados de resistencia al corte.



**Figura 4-60.** Condiciones iniciales - malla 3D (arriba) y resultados de la deformación horizontal (abajo)  
Elaboración propia a partir de (Plaxis B.V., 2004).



**Figura 4-61.** Resultados calibración curvas obtenidas del ensayo in situ y generadas por el software Plaxis 3D Foundation – E1 (superior izquierda), E2 (superior derecha) y E3 (inferior) – Distribuidora de Envigado.

Elaboración propia a partir de datos generados por el software.

**Tabla 4-6.** Parámetros de rigidez y resistencia al corte obtenidos a partir del ensayo HCT – “Distribuidora de Envigado”.

Muestra N°	$\phi'$ (°)	$c'$ (kPa)	E (kPa)	$\mu$ (Adim)	$\psi$ (°)
1	35,0	4,3	1600	0,32	0,0
2	36,0	5,6	2000	0,36	0,0
3	35,5	4,1	1600	0,30	0,0

Elaboración propia.



- **Finca Las Mercedes**

Para hallar los parámetros de resistencia al corte de las pruebas realizadas en la Finca Las Mercedes, se procedió de manera análoga a lo descrito en la sección anterior. En este caso, se excavó una trinchera de 4,0 m de largo, 0,8 m de ancho y 0,8 m de profundidad; en donde se pudo identificar un depósito de vertiente con bloques angulares a subangulares. La matriz por su parte era de textura arcillosa, muy plástica.



**Figura 4-62.** Trinchera excavada para ensayo en Finca Las Mercedes.

Elaboración propia.

En la Figura 4-62, Figura 4-63, Figura 4-64 y Figura 4-65 se presenta un registro fotográfico del sitio, material estudiado y pruebas realizadas.



**Figura 4-63.** Material típico encontrado en Finca Las Mercedes.  
Elaboración propia.



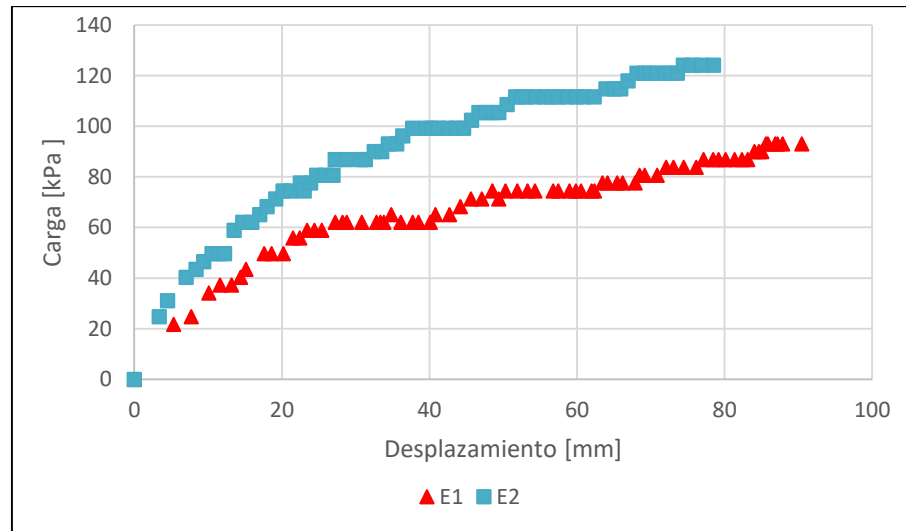
**Figura 4-64.** Evidencia de la tortuosidad de la superficie de falla – E1 – Finca Las Mercedes.  
Elaboración propia.





**Figura 4-65.** Evidencia fotográfica ensayo E1 (izquierda) y E2 (derecha) – Finca Las Mercedes.  
Elaboración propia.

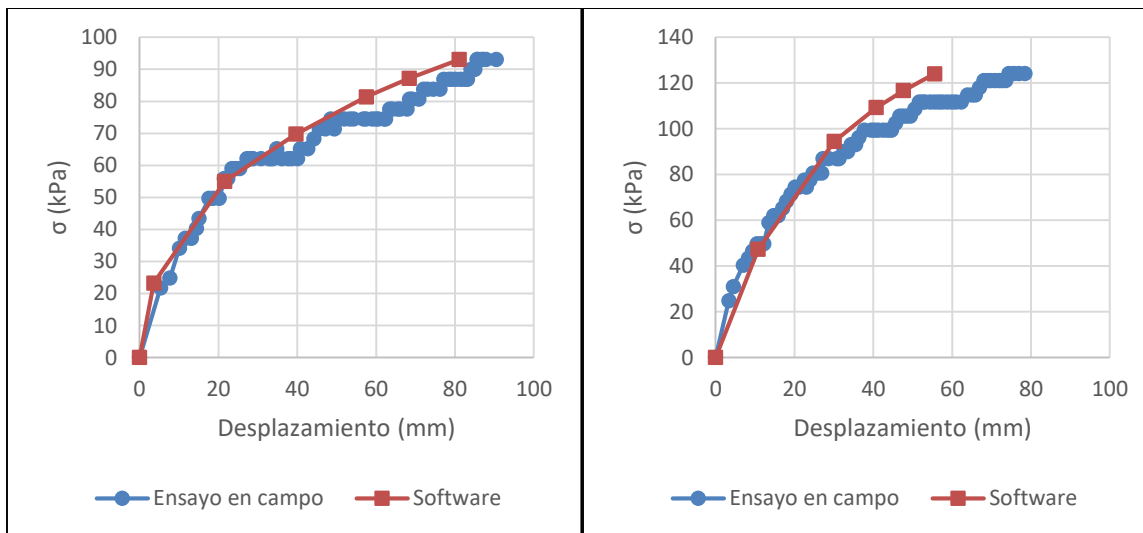
En la Figura 4-66 se presentan las curvas Esfuerzo-Desplazamiento construidas a partir de la información recolectada en campo. Se evidencia que el material que alcanzó la máxima resistencia corresponde al Ensayo 2 (E2), con un  $q_u$  igual a 124 kPa. Entre tanto, el Ensayos 1 (E1), alcanzó un valor de  $q_u$  igual a 93 kPa.



**Figura 4-66.** Curvas Esfuerzo-Desplazamiento obtenidas en Finca Las Mercedes.  
Elaboración propia.

Posteriormente, tras obtener las curvas Esfuerzo-Desplazamiento, se procedió a determinar los parámetros de resistencia al corte del depósito de vertiente. Para ello, se utilizó el software Plaxis 3D Foundation (Plaxis B.V., 2004), siguiendo el mismo procedimiento presentado en la sección anterior.

Los resultados se presentan en la Figura 4-67 y Tabla 4-7. Éstos son un poco llamativos para el material encontrado, el cual, de acuerdo a los ensayos de laboratorio, se clasificó como una arcilla de alta plasticidad (ver Tabla 4-17); por lo que se esperaba que la cohesión jugara un papel más importante. A pesar de ello, cuando se realizó la modelación, cualquier leve incremento de este parámetro, generaba un gran aumento en la resistencia, por lo que las curvas generadas con el software no eran concordantes con los resultados recopilados en campo. Al final, las curvas se acoplaron al asumir los parámetros presentados en la Tabla 4-7.



**Figura 4-67.** Resultados calibración curvas obtenidas del ensayo in situ y arrojadas por el software – E1 (izquierda) y E2 (derecha) – Finca Las Mercedes. Elaboración propia.

**Tabla 4-7.** Parámetros de rigidez y resistencia al corte obtenidos a partir del ensayo HCT – “Finca Las Mercedes”.

Muestra N°	$\phi'$ (°)	$c'$ (kPa)	E (kPa)	$\mu$ (Adim)	$\psi$ (°)
1	26,5	3,0	150	0,32	0,0
2	30,0	2,7	300	0,30	0,0

Elaboración propia.

#### 4.8.2 Caracterización física y geológica del material estudiado

Dado que el principal objetivo de la presente investigación es correlacionar los parámetros de resistencia al corte de los *bimsoils* con propiedades físicas como la proporción volumétrica de bloques *VBP*, la gradación o la forma de los bloques, es importante realizar una adecuada caracterización del material estudiado para validar los resultados presentados. Para ello, se realizaron ensayos en campo y laboratorio, de tal forma que se obtuviese la mayor información posible.

- **Distribuidora de Envigado**

Como se describió en la sección 3.4, el lugar de estudio se encuentra sobre la llanura aluvial, en la margen derecha del río Aburrá o río Medellín; sin embargo en él se encontró un llano antrópico.

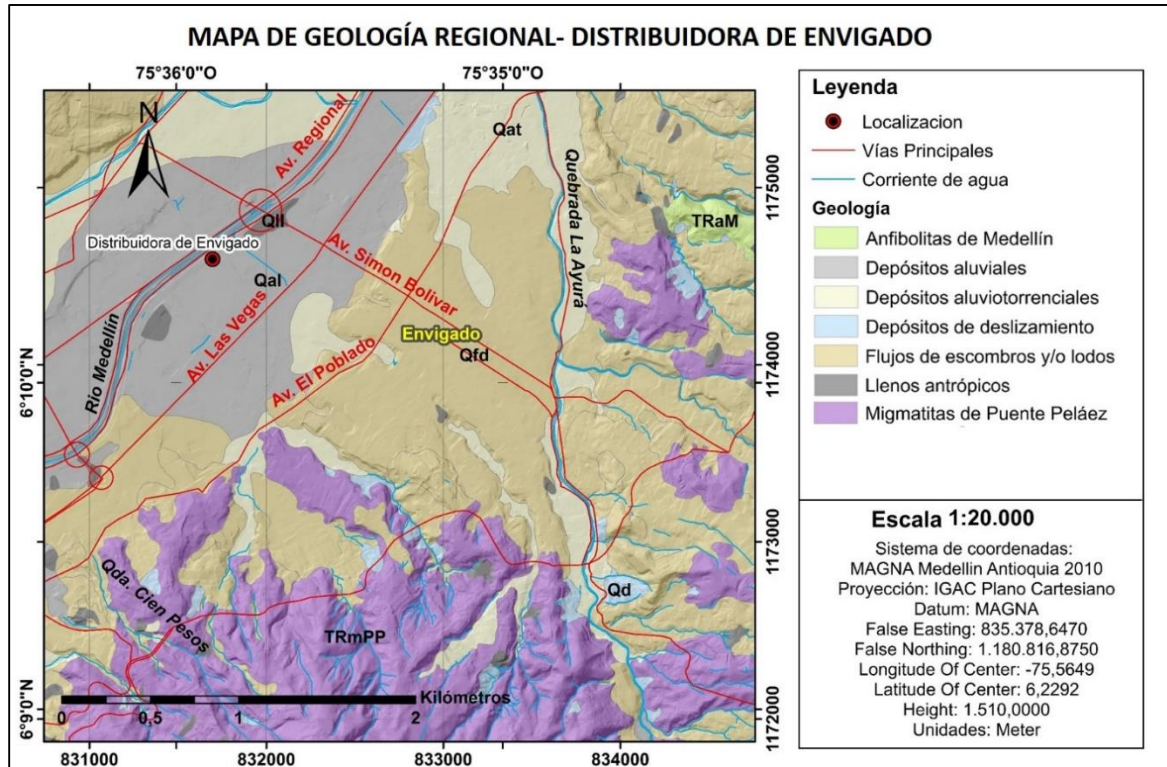
A continuación, se describe el procedimiento seguido para realizar la caracterización física y se presentan los resultados obtenidos:

#### ***Geología regional y local***

El sitio de estudio está localizado en la parte baja de la ladera oriental del valle de Aburrá, sobre la margen derecha del río Medellín y queda enmarcado en la plancha 147 “Medellín Oriental” a escala 1:100.000 del Servicio Geológico Colombiano (INGEOMINAS, 2005). Esta geología se puede correlacionar con la presentada en el estudio de microzonificación sísmica del (AMVA, 2007). En este sitio se tiene gran variedad de unidades lito estratigráficas de carácter metamórfico, depósitos aluviales y de vertiente no consolidados.

A continuación, se presenta una breve descripción de estas unidades geológicas según la cartografía oficial vigente.

En la Figura 4-68 se presenta el mapa de geología regional de la zona de estudio.



**Figura 4-68.** Mapa geológico regional – Distribuidora de Envigado. Elaboración propia a partir de (Esri Inc., 2015).

- **Depósitos aluviales (Qal)**

Son depósitos constituidos por materiales heterogéneos composicional y granulométricamente. Pueden contener fragmentos con tamaños desde arcillas hasta bloques métricos, pasando por arenas y gravas, según sea la energía de la corriente hídrica que lo genere. Están conformados por fragmentos ígneos, metamórficos y cuarzo. La continuidad horizontal de los estratos en estos depósitos es variable y está definida por la morfometría de la cuenca en la cual se depositan.

- **Depósitos aluviotorrenciales (Qat)**

Son depósitos generados por algunas corrientes durante avenidas torrenciales, en las cuales la alta energía del agua permite arrastrar materiales de granulometría heterogénea,

que incluyen desde bloques rocosos de tamaño variable hasta arenas finas, limos y arcillas. Estos materiales descienden por los cauces siguiendo un comportamiento turbulento, hasta alcanzar una zona con pendientes suaves, donde logran depositarse.

- **Depósitos de flujo de lodos y escombros (Qfd)**

Son depósitos derivados de procesos denudativos que se generan en la parte alta de vertientes con pendientes abruptas a moderadas. Se producen cuando el perfil de suelo es sometido a eventos sísmicos o de lluvias prolongadas causando su saturación y la pérdida de resistencia al corte. Debido a la naturaleza de estos fenómenos los materiales fluyen de forma caótica y son depositados solo cuando alcanzan zonas de pendientes bajas; su composición puede ser muy variada y su selección muy pobre. De acuerdo con la proporción de matriz y bloques se clasifican como flujos de lodos donde predomina la fracción fina, y flujos de escombros donde predomina la fracción gruesa. A nivel regional se encuentran este tipo de depósitos en ambos márgenes del río Medellín en la parte baja de las vertientes. A nivel local este es el material objeto de estudio.

- **Llenos antrópicos (QII)**

Son materiales heterogéneos granulométrica y composicionalmente. Pueden estar constituidos por materiales muy diversos que abarcan desde fragmentos rocosos hasta escombros, metales y desechos plásticos. Estos depósitos pueden abarcar áreas y volúmenes muy variables, dependiendo de la finalidad de su conformación. Estos llenos se conforman con el fin de obtener un terreno adecuado para la construcción de algunas viviendas y en la construcción de las calles que atraviesan la zona.

- **Depósitos de deslizamiento (Qd)**

Los depósitos de deslizamiento constituyen cuerpos pequeños y aislados, localizados sobre las vertientes de pendiente moderada y baja. Están asociados directamente a procesos morfodinámicos que se generan en zonas inestables de la vertiente.

- **Anfibolitas de Medellín (TRaM)**

Hace parte del grupo El Retiro dentro en el complejo Cajamarca. Es una roca máfica de color oscuro y textura foliada con variaciones entre esquistosidad y bandeamiento



gnésico. Se componen de cristales gruesos de plagioclasas y hornblenda. Es común encontrar dentro de esta unidad venas de cuarzo de hasta 5 cm de espesor.

- **Milgmatitas de Puente Pelaez (TRmPP)**

Es un cuerpo alargado con tendencia N-S constituido por gneises biotíticos y granofelsas de cuarzo y feldespato. Presentan bandas de color blanco que conforman el leucosoma y bandas grises que corresponden al melanosoma. En el sector estudiado no se tiene evidencia alguna de estas rocas.

Por otro lado, de acuerdo con la geología regional, en el sitio se esperaba encontrar el depósito aluvial del río Medellín; como se evidenciaba en sitios cercanos, donde por razón de la obra no se tuvo acceso; de tal forma de poder falla depósitos con bloques de forma redondeada y subredondeada. Sin embargo, de acuerdo con el material recuperado en las muestras analizadas en laboratorio, la excavación donde se llevaron a cabo las pruebas se hizo en un lleno antrópico.

El depósito antrópico está caracterizado por tener una matriz de color marrón oscura, con gran contenido de material orgánico como raíces y fragmentos de madera, especialmente los primeros 30 cm. La matriz presenta una textura limo-arcillosa. Los bloques son de composición heterogénea, donde se pueden apreciar fragmentos principalmente de cuarzo lechoso, gabros, y algunos fragmentos de esquistos; observándose también algunos gneiss cuarzo-moscovíticos y granitos. Los bloques presentan baja esfericidad y varían de subredondeados, típicos de depósitos aluviales; a angulares, propios de depósitos e vertiente. En la Figura 4-69 se observan las muestras extraídas.




**Figura 4-69.** Material extraído del sitio “Distribuidora de Envigado”. Muestra N°1 (izquierda), Muestra N°2 (intermedio) y Muestra N°3 (derecha). Elaboración propia.



### ***Densidad del material***

Para conocer la densidad in situ del depósito estudiado, se llevó a cabo un ensayo en campo. Este, aunque artesanal, permite tener un orden de magnitud de este parámetro. El procedimiento consistió en realizar una excavación y medir el peso del material extraído. Posteriormente se revistió la excavación con un plástico y se llenó con agua, midiendo el volumen de líquido requerido para alcanzar el nivel original del terreno. Con estos datos se procedió a determinar la densidad. Los resultados se presentan en la Tabla 4-8.

**Tabla 4-8.** Resultados ensayo de densidad in situ – “Distribuidora de Envigado”.


Peso del material extraído (Kg)	Volumen de líquido (m <sup>3</sup> )	Densidad del depósito (Kg/m <sup>3</sup> )	Registro fotográfico
22.4	0.0126	1777.8	





Elaboración propia.

### ***Forma de las partículas***

Para determinar la forma de las partículas, se midieron las dimensiones de los ejes principales de las partículas mayores (largo, alto y ancho). En la Tabla 4-9 se presentan los resultados obtenidos.

**Tabla 4-9.** Resultados forma de partículas – “Distribuidora de Envigado”

Muestra N°	Tamiz	Largo (mm)	Alto (mm)	Ancho (mm)	Forma	Registro fotográfico
1	1"	56	27	33	Subangulosa	
1	2"	88	38	58	Subredondeada	
2	1"	74	26	44	Subangulosa	
2	1 1/2"	58	35	46	Subredondeada	
2	2"	96	48	60	Subangulosa /Subredondeada	
2	3 1/2"	129	46	87	Subredondeada	

Muestra N°	Tamiz	Largo (mm)	Alto (mm)	Ancho (mm)	Forma	Registro fotográfico
3	1"	57	30	43	Subredondeada	
3	1 1/2"	79	32	49	Subangulosa	
3	2"	88	28	61	Subangulosa	
3	3"	88	65	78	Subredondeada	

Elaboración propia.

De los resultados, se evidencia que hay predominancia de partículas tanto subangulares, como subredondeadas. Lo anterior, debido a que el lleno antrópico posiblemente se realizó con material proveniente de depósitos aluviales (forma subredondeada) y de vertiente o cantera (forma subangular)

### **Resistencia de los bloques**

Para determinar la resistencia a la compresión simple *UCS* de los bloques de roca, se llevó a cabo el ensayo de carga puntual, de acuerdo a las recomendaciones de la norma (ASTM

Designation: D5731-16, Reapproved 2016). El ensayo consiste en aplicar carga por medio de una prensa que sujeta un bloque irregular a través de unas puntas cónicas. A partir del valor medido de resistencia por punta  $P$ , y en función del diámetro equivalente del espécimen  $D_e$ , es posible hallar  $UCS$ . Los resultados deben corregirse en función del diámetro de la muestra, de acuerdo con las recomendaciones de la norma. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4-10.

**Tabla 4-10.** Resultados ensayo de carga puntal – “Distribuidora de Envigado”

Muestra N°	Largo (mm)	Alto (mm)	Ancho (mm)	Peso (g)	P (N)	De (mm)	Is <sub>50</sub> (MPa)	UCS (MPa)
1	88	38	58	167.6	3100	53.0	1.13	26.6
2	129	46	87	700.5	5200	71.4	1.20	32.2
3	88	28	61	172.7	8500	46.6	3.79	84.4

Elaboración propia.

En la Figura 4-70 se presentan los bloques fallados. De los resultados, se tienen resistencias de los bloques entre 26,6 MPa y 84,4 MPa, con un promedio de 47,7 MPa. Estos valores son muy superiores a la resistencia de la matriz, por lo que se cumple uno de los requisitos para que el material sea catalogado como *bimsoil*; es decir, que haya un contraste en la resistencia de matriz y bloque (ver sección 2.2).



**Figura 4-70.** Bloques fallados en prueba de carga puntal – Distribuidora de Envigado. Muestra N°1 (izquierda), Muestra N°2 (intermedio) y Muestra N°3 (derecha). Elaboración propia.

### **Granulometría, clasificación, humedad natural y gravedad específica**

Para caracterizar el material recuperado se realizaron pruebas de clasificación y propiedades índice en el laboratorio, tales como determinación del contenido de humedad natural del suelo (ASTM Designation: D2216-16, Reapproved 2019), determinación de los límites de consistencia (límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad) sobre la fracción fina o que pasa el tamiz N°40 (ASTM Designation: D4318-17, Reapproved 2017), análisis granulométrico por tamizado (ASTM Designation: D6913/D6913M-17, Reapproved 2017) y determinación de la gravedad específica de los sólidos  $G_s$  (ASTM Designation: D854-14, Reapproved 2014). Los resultados se presentan en la Tabla 4-11.

**Tabla 4-11.** Resultados ensayos de clasificación y propiedades índice – “Distribuidora de Envigado”

Muestra N°	w (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	% Grava	% Arena	% Finos	AASHTO	UCSC	Cu	Cc	Gs
1	16.8	41	27	14	50.87	47.29	1.83	A-2-7 (0)	GW	19.7	1.28	2.57
2	9.7	42	26	16	57.84	40.43	1.73	A-2-7 (0)	GP	32.6	0.9	-
3	16.7	45	29	16	58.36	40.73	0.91	A-2-7 (0)	GW	15	1.46	2.59

Elaboración propia.

De los resultados se observa que el material encontrado es de carácter granular, clasificando todas las muestras como gravas ( $GW$  y  $GP$ ). El depósito tiene una humedad ( $w$ ) promedio de 14,4%, un límite líquido ( $LL$ ) promedio de 42,7%, un límite plástico ( $LP$ ) promedio de 27,3% y un índice de plasticidad ( $IP$ ) promedio de 15,3%. Es importante añadir que, dado que el contenido de finos es inferior al 5,0%, la clasificación del material no requería la realización de límites de consistencia.

Por otro lado, el depósito antrópico tiene un contenido promedio de gravas del 55,7%, un contenido promedio de arenas del 42,8% y un contenido de finos de 1,49%. En cuanto a los coeficientes de uniformidad ( $Cu$ ) y curvatura ( $Cc$ ), los valores promedio son de 22,4 y 1,21, respectivamente. Finalmente, el valor promedio de la gravedad específica de sólidos ( $G_s$ ) fue de 2,58.

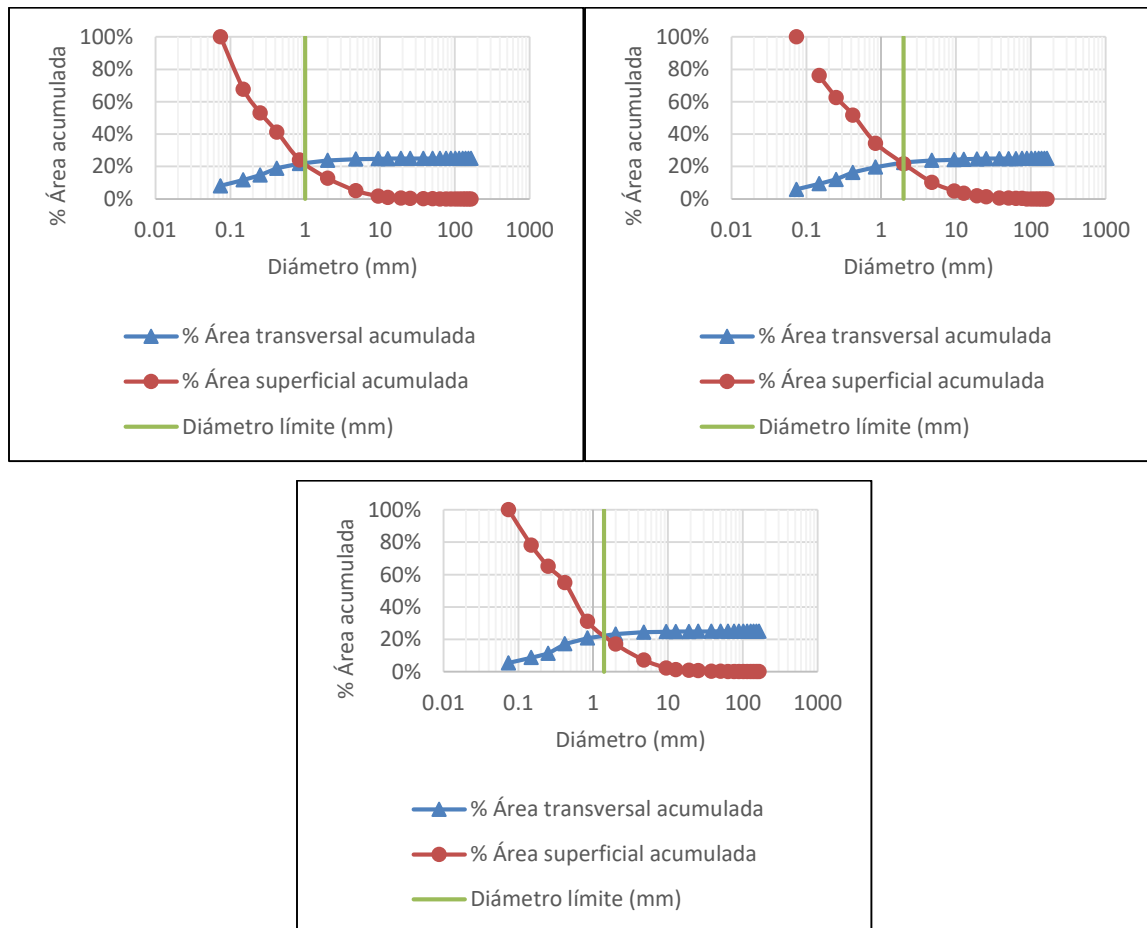
### Límite matriz-bloque y proporción volumétrica de bloques VBP

Para determinar el límite entre matriz y bloque y la proporción volumétrica de los mismos VBP, se siguió la metodología presentada en la sección 2.2.2 y 2.2.3. Los resultados se presentan en la Tabla 4-12, Tabla 4-13, Figura 4-71 y Figura 4-72.

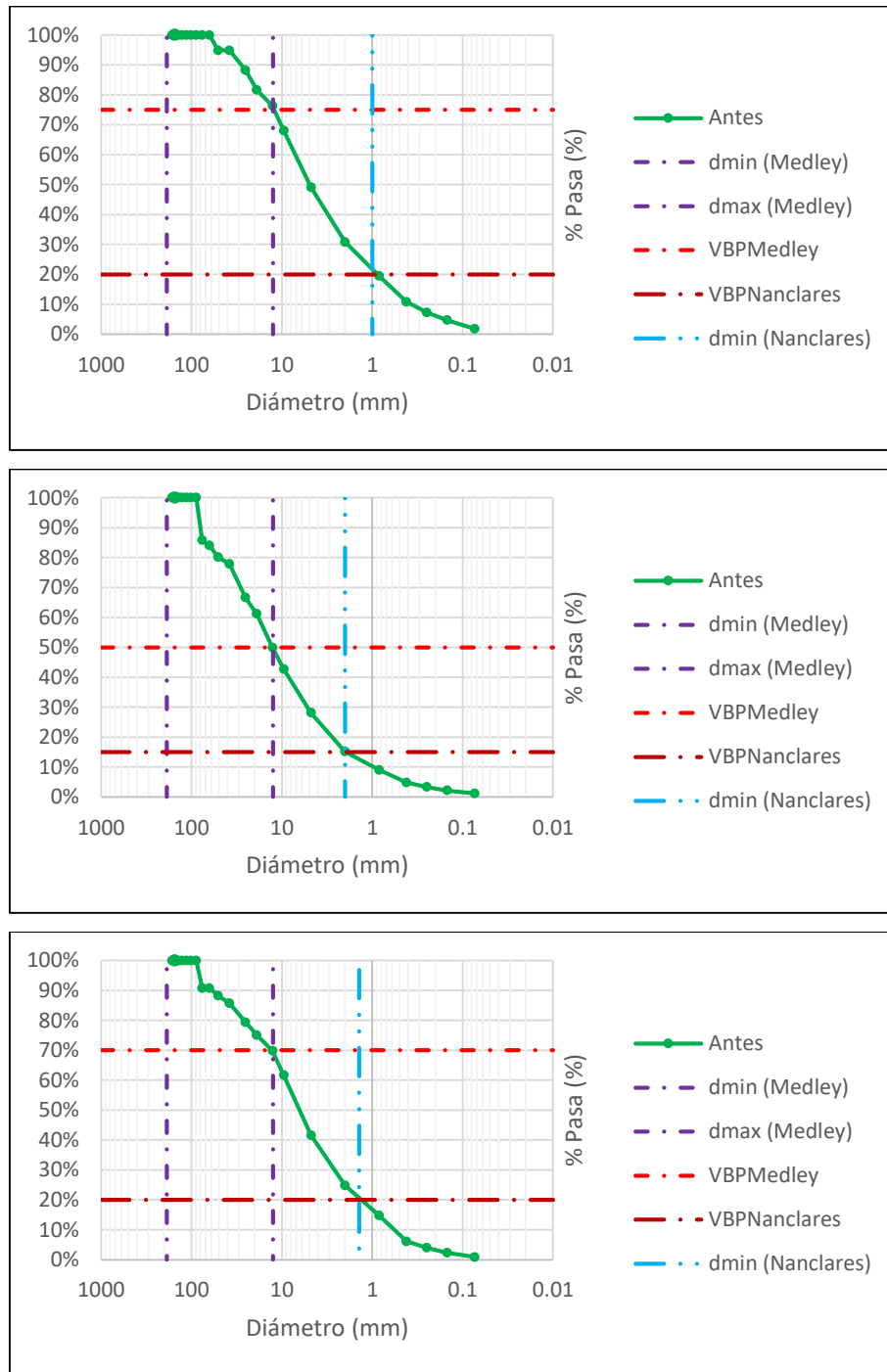
**Tabla 4-12.** Límite matriz bloque para las muestras extraídas de Distribuidora de Envigado, usando la metodología de (Medley E. , 1994).

Muestra N°	Lc (m)	Límite matriz bloque (m)	Tamaño máximo bloque (m)
1	0.25	0.0125	0.1875
2	0.25	0.0125	0.1875
3	0.25	0.0125	0.1875

Elaboración propia.



**Figura 4-71.** Resultados límite matriz bloque para Muestra N°1 (superior-izquierda), Muestra N°2 (superior-derecha) y Muestra N°3 (inferior) usando la metodología de (Nanclares, 2018) – Distribuidora de Envigado. Elaboración propia.



**Figura 4-72.** Resultados VBP bloque para Muestra N°1 (superior), Muestra N°2 (intermedio) y Muestra N°3 (inferior) – Distribuidora de Envigado. Elaboración propia.

**Tabla 4-13.** VBP para las muestras recuperadas de Distribuidora de Envigado, estudiados usando la metodología de (Medley E. , 1994) y (Nanclares, 2018).

Muestra N°	VBP (%)		$\Delta$ VBP (%)
	Medley (1994)	Nanclares (2008)	
1	25%	80%	220.0%
2	50%	85%	70.0%
3	30%	80%	166.7%

Elaboración propia.

#### ▪ Finca Las Mercedes

En este sitio se ejecutaron dos (2) de las cinco (5) pruebas realizadas. Como se describió en el capítulo 3.4, el lugar de estudio se encuentra en predios de la Facultad de Minas, noroccidente de la ciudad de Medellín, en el cual, de acuerdo a la geología regional, se esperaba encontrar un depósito de vertiente con bloques angulares y subangulares.

A continuación, se describe se presentan los resultados obtenidos:

#### ***Geología regional y local***

El sitio de estudio está localizado en la parte baja de la ladera occidental del valle de Aburrá y queda enmarcado en la plancha 146 “Medellín Occidental” a escala 1:100.000 del Servicio Geológico Colombiano (INGEOMINAS, 1983). Esta geología se puede correlacionar con la presentada en el estudio de microzonificación sísmica del Valle de Aburrá (AMVA, 2007). En este sitio se tiene gran variedad de unidades lito estratigráficas de carácter metamórfico, depósitos aluviales y de vertiente no consolidados. A continuación, se presenta una breve descripción de estas unidades geológicas según la cartografía oficial vigente. Dado que algunas unidades ya se detallaron en párrafos anteriores, solo se describirán las nuevas unidades litológicas encontradas en esta zona.

En la Figura 4-73 se presenta el mapa de geología regional de la zona de estudio.

#### • **Metagabros del Picacho (KJmbP)**

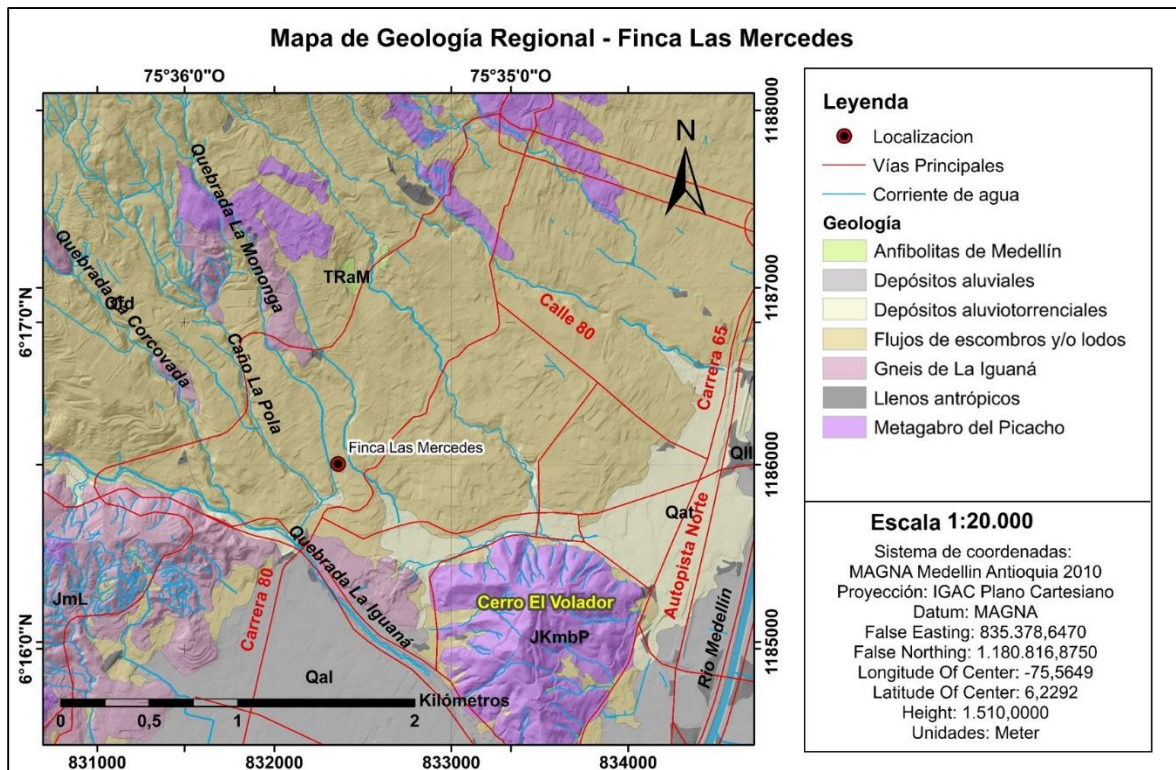
Son rocas metamórficas de composición máfica, mineralógicamente está compuesta por hornblenda y plagioclasa. Presentan dos eventos metamórficos sobrepuestos, uno



dinámico y otro térmico. Su mayor expresión aflora en el cerro El Picacho en Medellín, pero puede encontrarse en otros sectores del Valle de Aburrá principalmente en el flanco Occidental.

- **Gneis de la Iguaná (JmL)**

Corresponde a un gneis feldespático con cuarzo; por meteorización desarrolla suelos residuales con espesores variables, que pueden superar los 15,0 m. Los terrenos desarrollados sobre esta unidad litológica son susceptibles a la erosión laminar y concentrada, evidenciada por una gran cantidad de cicatrices de surcos y cárcavas. El perfil de meteorización corresponde inicialmente a un suelo de carácter limoso con variaciones a arena fina de colores claros, intercalados con otros limos arenosos.



**Figura 4-73.** Mapa geológico regional – Finca Las Mercedes. Elaboración propia a partir de (Esri Inc., 2015).

Por otro lado, de acuerdo al material recuperado de las dos (2) muestras extraídas, se observa una composición idéntica en ambas; siendo estas un depósito con fragmentos subangulares a angulares, típicos de depósitos de vertiente. La matriz es limosa, de color


marrón, con fragmentos de tamaño variable que alcanzan un tamaño máximo de 15 cm. Estos presentan una composición muy homogénea caracterizada por un gabro de anfíbol y plagioclasas, que presentan una orientación preferencial, lo cual indica una leve transformación a anfibolita. En la Figura 4-74 se muestra el material extraído.



**Figura 4-74.** Material extraído del sitio “Finca Las Mercedes”. Fragmentos (izquierda), Muestra N°1 (intermedio) y Muestra N°2 (derecha).  
Elaboración propia.

### **Densidad del material**

**Tabla 4-14.** Resultados ensayo de densidad in situ – “Finca Las Mercedes”

<b>Peso del material extraído (Kg)</b>	<b>Volumen de líquido (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidad del depósito (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Registro fotográfico</b>
15.55	0.0086	1808.1	

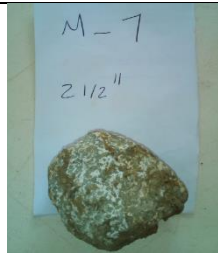


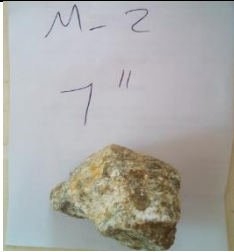
Elaboración propia.

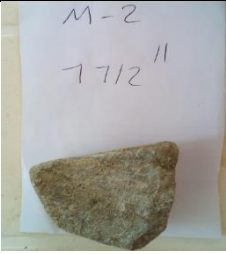


Para determinar la densidad in situ del depósito, se siguió el mismo procedimiento que en la Distribuidora de Envigado. Los resultados se presentan en la Tabla 4-14.

### **Forma de las partículas**

De manera análoga al procedimiento seguido con las muestras recuperadas de la Distribuidora de Envigado, se procedió con las muestras de la Finca Las Mercedes. En la Tabla 4-15 se presentan los resultados obtenidos.

**Tabla 4-15. Resultados forma de partículas – “Finca Las Mercedes”**

Muestra N°	Tamiz	Largo (mm)	Alto (mm)	Ancho (mm)	Forma	Registro fotográfico
1	2 1/2"	73	40	61	Subredondeada	
1	3"	170	35	81	Subangulosa	
1	3"	97	47	75	Subangulosa	
2	1"	58	32	45	Subangulosa	

Muestra N°	Tamiz	Largo (mm)	Alto (mm)	Ancho (mm)	Forma	Registro fotográfico
2	1 1/2"	60	26	46	Subangulosa	
2	2"	80	23	58	Subangulosa	
2	4 1/2"	155	74	110	Subangulosa	

Elaboración propia.

De los resultados, se evidencia que hay predominancia de partículas subangulares; lo cual es concordante con el origen del material, correspondiente a un depósito de vertiente.

### **Resistencia de los bloques**

De manera análoga al procedimiento descrito anteriormente, se determinó la resistencia a la compresión simple UCS de los bloques extraídos del sitio Finca Las Mercedes. Los resultados se presentan en la Tabla 4-16.

**Tabla 4-16.** Resultados ensayo de carga puntal – “Finca Las Mercedes”

Muestra N°	Largo (mm)	Alto (mm)	Ancho (mm)	Peso (g)	P (N)	De (mm)	Is <sub>50</sub> (MPa)	UCS (MPa)
1	97	47	75	799.2	24500	67.0	6.23	162.3
2	80	23	58	168.4	3800	41.2	2.05	43.7

Elaboración propia.





**Figura 4-75.** Bloques fallados en prueba de carga puntual – Finca Las Mercedes. Muestra N°1 (izquierda) y Muestra N°2 (derecha). Elaboración propia.

En la Figura 4-75 se presentan los bloques fallados. La resistencia de los bloques es de 43,7 MPa y 162,3 MPa. Estos valores son muy superiores a la resistencia de la matriz, por lo que se cumple uno de los requisitos para que el material sea catalogado como *bims*; es decir, que haya un contraste en la resistencia de matriz y bloque (ver sección 2.2).

#### ***Granulometría, clasificación, humedad natural y gravedad específica***

Para determinar la granulometría y propiedades índices de las muestras extraídas de la Finca Las Mercedes, se siguió la misma metodología presentada anteriormente. Los resultados se presentan en la Tabla 4-17.

**Tabla 4-17.** Resultados ensayos de clasificación y propiedades índice – “Finca Las Mercedes”

Muestra N°	w (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	% Grava	% Arena	% Finos	AASHTO	UCSC	Cu	Cc	Gs
1	35.2	77	29	48	19.96	19.16	60.88	A-7-6 (20)	CH	-	-	2.6
2	33.3	75	29	46	8.13	24.29	67.58	A-7-6 (20)	CH	-	-	2.54

Elaboración propia.

De los resultados se observa que el material encontrado es de carácter cohesivo, clasificando todas las muestras como arcillas de alta plasticidad (*CH*). El depósito tiene una humedad (*w*) promedio de 33,9%, un límite líquido (*LL*) promedio de 75,7%, un límite plástico (*LP*) promedio de 29,0% y un índice de plasticidad (*IP*) promedio de 46,7%. Por otro lado, el depósito tiene un contenido promedio de gravas del 14,0%, un contenido promedio de arenas del 21,7% y un contenido de finos de 64,2%. Finalmente, el valor promedio de la gravedad específica de sólidos (*G<sub>s</sub>*) fue de 2,57.

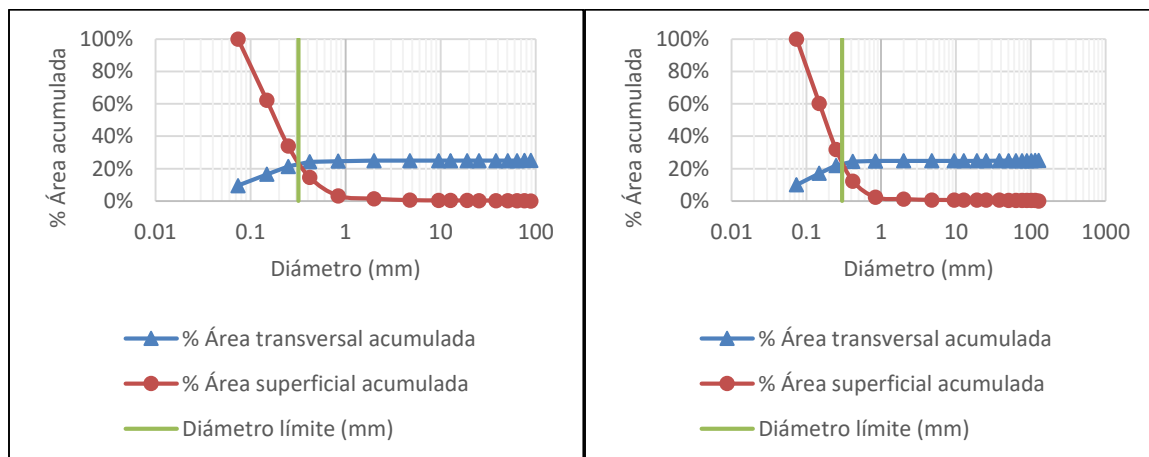
### Límite matriz-bloque

Para determinar el límite entre matriz y bloque y la proporción volumétrica de los mismos *VBP*, se siguió la metodología presentada en la sección 2.2.2 y 2.2.3. Los resultados se presentan en la Tabla 4-18, Tabla 4-19, Figura 4-76 y Figura 4-77.

**Tabla 4-18.** Límite matriz bloque para las muestras extraídas de Finca Las Mercedes, usando la metodología de (Medley E. , The Engineering Characterization of Melanges and Similar Block-in-Matrix Rocks (Bimrocks), 1994).

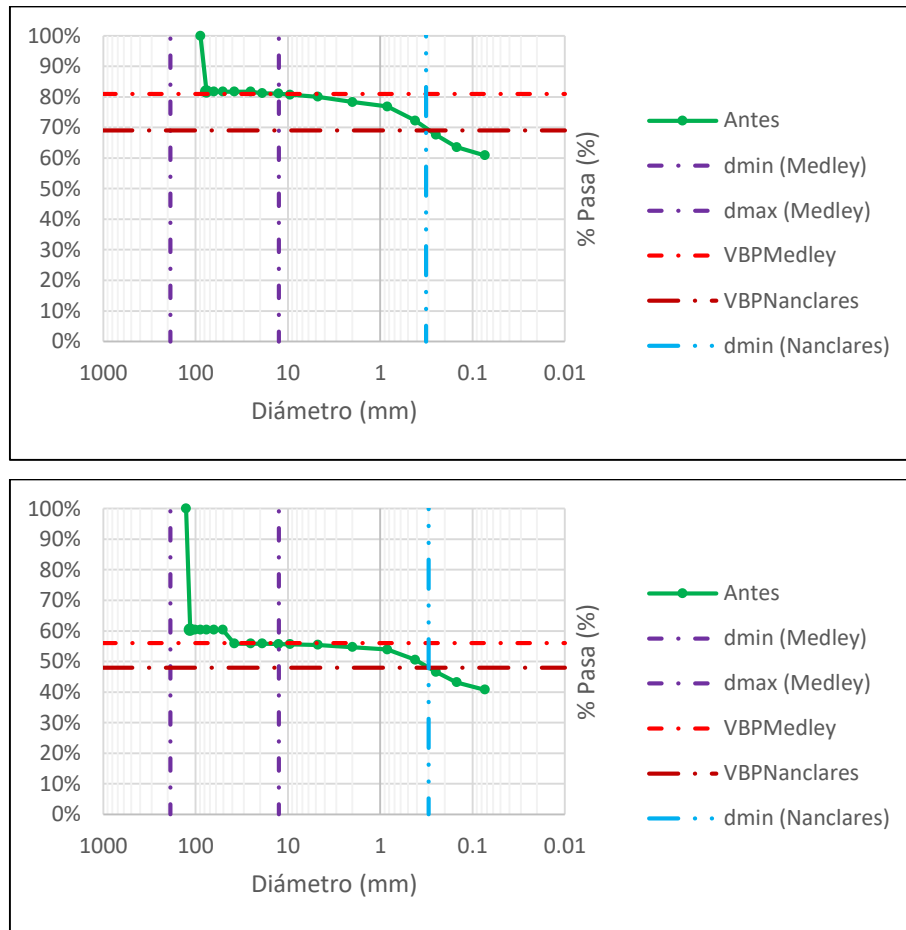
Muestra N°	Lc (m)	Límite matriz bloque (m)	Tamaño máximo bloque (m)
1	0.25	0.0125	0.1875
2	0.25	0.0125	0.1875
3	0.25	0.0125	0.1875

Elaboración propia.



**Figura 4-76.** Resultados límite matriz bloque para Muestra N°1 (superior-izquierda) y Muestra N°2 (superior-derecha), usando la metodología de (Nanclares, 2018) – Finca Las Mercedes.

Elaboración propia.



**Figura 4-77.** Resultados VBP bloque para Muestra N°1 (superior) y Muestra N°2 (inferior) – Finca Las Mercedes. Elaboración propia.

**Tabla 4-19.** VBP para las muestras recuperadas de Finca Las Mercedes, estudiados usando la metodología de (Medley E. , The Engineering Characterization of Melanges and Similar Block-in-Matrix Rocks (Bimrocks), 1994) y (Nanclares, 2018).

Muestra N°	VBP (%)		ΔVBP (%)
	Medley (1994)	Nanclares (2008)	
1	19%	31%	63.2%
2	44%	52%	18.2%

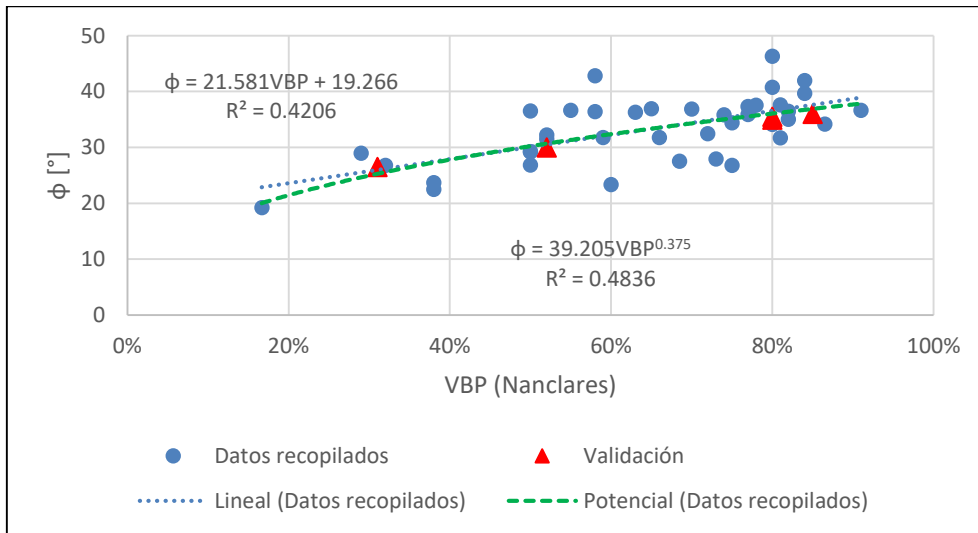
Elaboración propia.

### 4.8.3 Resultados comparación datos in situ vs correlaciones

#### Validación inicial

Tras encontrar los parámetros de resistencia a partir de las pruebas en campo (Ver Tabla 4-6 y Tabla 4-7); y luego de haber obtenido a través de pruebas de laboratorio la granulometría, propiedades índice y proporción de bloques (Ver Tabla 4-11, Tabla 4-13, Tabla 4-17 y Tabla 4-19), se procede a validar las correlaciones que mejores resultados presentaron.

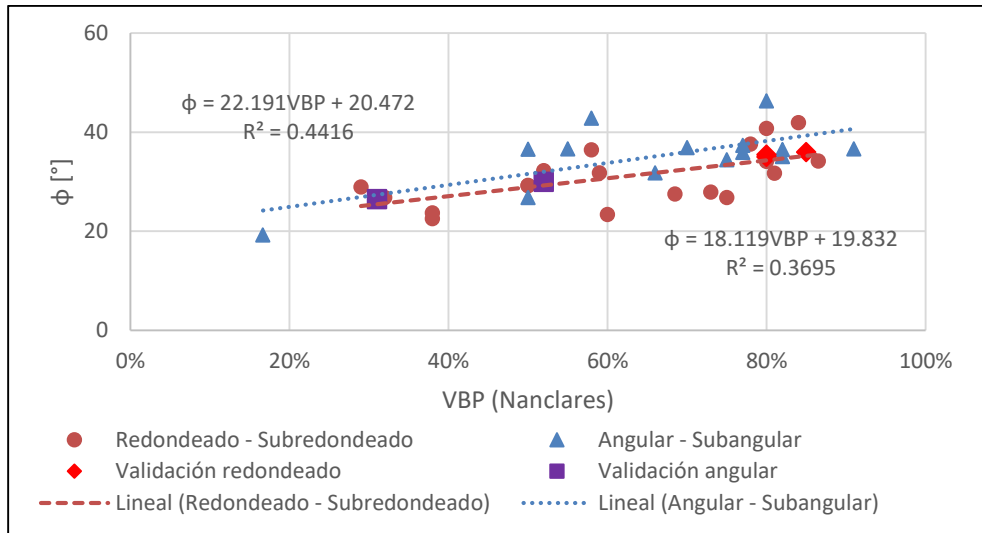
Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 4-78, Figura 4-79, Figura 4-80, Figura 4-81, Tabla 4-20 y Tabla 4-21.



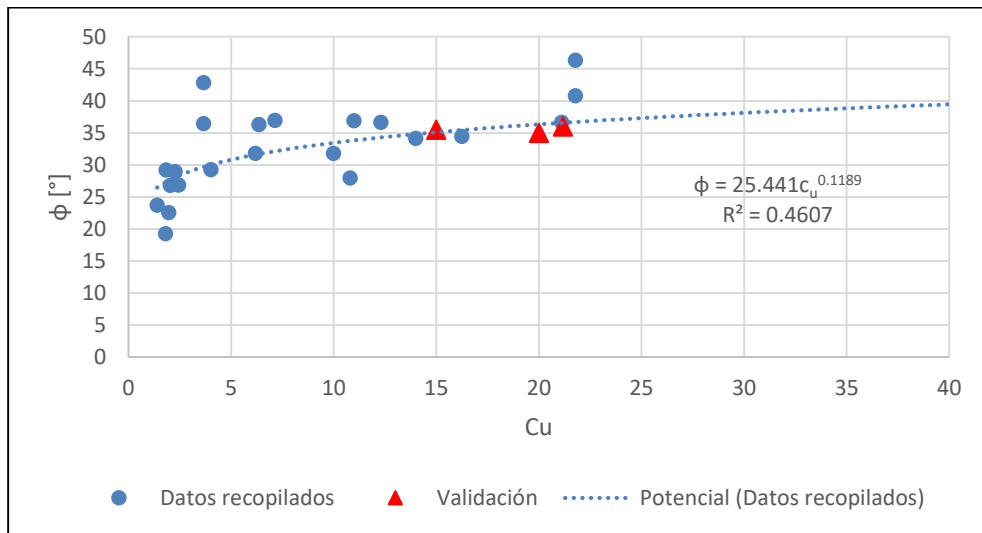
**Figura 4-78.** Validación de la correlación lineal y potencial entre el ángulo de fricción  $\phi'$  y la VBP hallada por el método de Nanclares. Elaboración propia.

Los resultados evidencian que, a excepción de las tendencias propuestas usando la metodología de Medley para obtener  $VBP$ , todas las correlaciones presentan un muy buen comportamiento. El error promedio obtenido para las ecuaciones varía entre 2,2% y 7,2%; con una media de 3,6%.

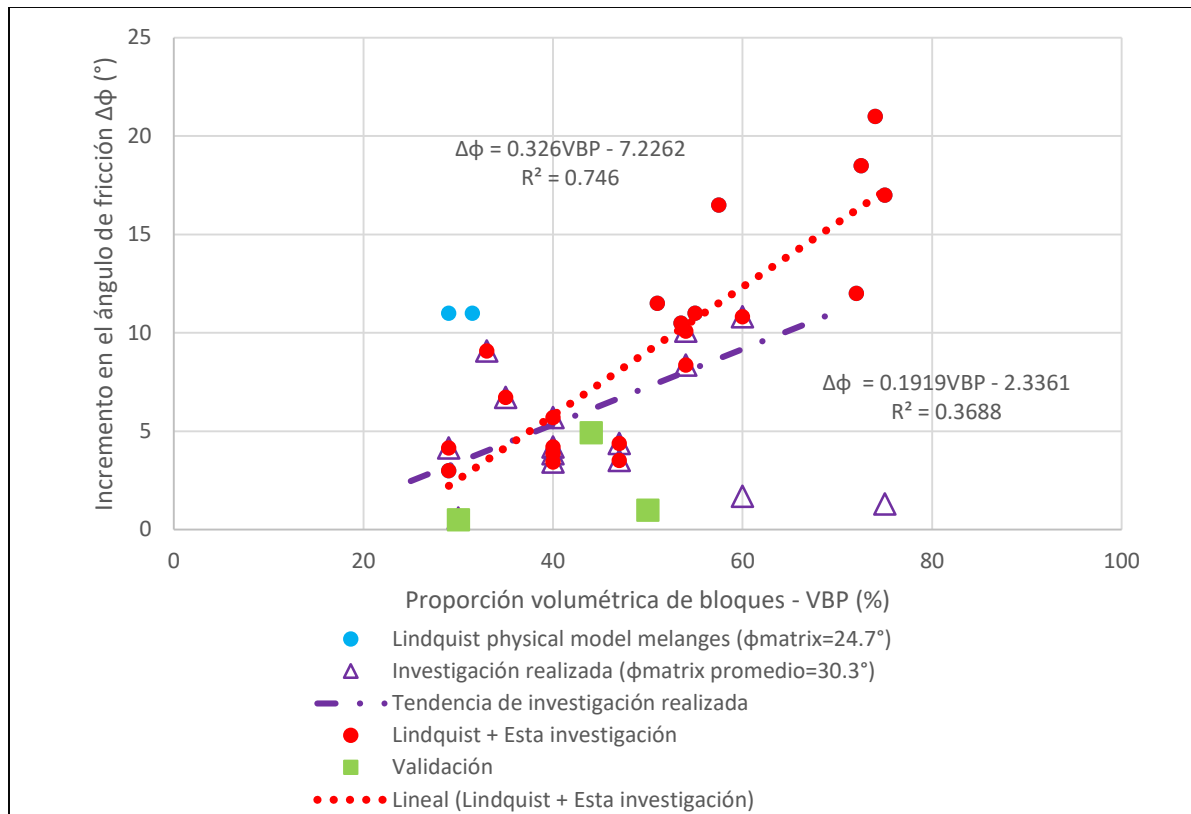




**Figura 4-79.** Validación de la correlación lineal entre el ángulo de fricción  $\phi'$  y la VBP hallada por el método de Nanclares, para diferentes formas de bloques. Elaboración propia.



**Figura 4-80.** Validación de la correlación potencial entre el ángulo de fricción  $\phi'$  y el  $c_u$ . ( $Cu < 100$ ). Elaboración propia.



**Figura 4-81.** Validación de la correlación lineal entre el incremento del ángulo de fricción  $\Delta\phi'$  y la VBP hallada por el método de Medley – Tendencia obtenida en esta investigación y conjugando con valores obtenidos por Lindquist. Elaboración propia.

**Tabla 4-20.** Resultados de la validación de las correlaciones propuestas.

Muestra N°	Sitio	Correlación	Metodología VBP	Tipo	$\phi/\Delta\phi_{\text{correlación}} (^{\circ})$	$\phi/\Delta\phi_{\text{HCT}} (^{\circ})$	Error (%)
1	Distribuidora de Envigado	$\phi$ vs VBP	Nanclares	Lineal	36.5	35.0	-4.4%
1	Distribuidora de Envigado	$\phi$ vs VBP	Nanclares	Potencial	36.1	35.0	-3.0%
1	Distribuidora de Envigado	$\phi$ vs VBP	Nanclares	Lineal (Redondeado)	34.3	35.0	1.9%
1	Distribuidora de Envigado	$\phi$ vs VBP	Nanclares	Lineal (Angular)	38.2	35.0	-9.2%
1	Distribuidora de Envigado	$\phi$ vs $c_u$	N/A	Potencial	36.3	35.0	-3.8%
1	Distribuidora de Envigado	$\Delta\phi$ vs VBP	Medley	Lineal (Esta investigación+Lindquist)	N/A	N/A	N/A
1	Distribuidora de Envigado	$\Delta\phi$ vs VBP	Medley	Lineal (Esta investigación)	N/A	N/A	N/A
2	Distribuidora de Envigado	$\phi$ vs VBP	Nanclares	Lineal	37.6	36.0	-4.5%
2	Distribuidora de Envigado	$\phi$ vs VBP	Nanclares	Potencial	36.9	36.0	-2.5%
2	Distribuidora de Envigado	$\phi$ vs VBP	Nanclares	Lineal (Redondeado)	35.2	36.0	2.1%
2	Distribuidora de Envigado	$\phi$ vs VBP	Nanclares	Lineal (Angular)	39.3	36.0	-9.3%
2	Distribuidora de Envigado	$\phi$ vs $c_u$	N/A	Potencial	36.6	36.0	-1.6%
2	Distribuidora de Envigado	$\Delta\phi$ vs VBP	Medley	Lineal (Esta investigación+Lindquist)	9.1	1.0	-807.4%
2	Distribuidora de Envigado	$\Delta\phi$ vs VBP	Medley	Lineal (Esta investigación)	7.3	1.0	-626%
3	Distribuidora de Envigado	$\phi$ vs VBP	Nanclares	Lineal	36.5308	35.5	-2.9%
3	Distribuidora de Envigado	$\phi$ vs VBP	Nanclares	Potencial	36.1	35.5	-1.6%
3	Distribuidora de Envigado	$\phi$ vs VBP	Nanclares	Lineal (Redondeado)	34.3	35.5	3.3%
3	Distribuidora de Envigado	$\phi$ vs VBP	Nanclares	Lineal (Angular)	38.2	35.5	-7.7%
3	Distribuidora de Envigado	$\phi$ vs $c_u$	N/A	Potencial	35.1	35.5	1.1%
3	Distribuidora de Envigado	$\Delta\phi$ vs VBP	Medley	Lineal (Esta investigación+Lindquist)	2.6	0.5	-410.8%
3	Distribuidora de Envigado	$\Delta\phi$ vs VBP	Medley	Lineal (Esta investigación)	3.4	0.5	-584%
1	Finca Las Mercedes	$\phi$ vs VBP	Nanclares	Lineal	26.0	26.5	2.1%
1	Finca Las Mercedes	$\phi$ vs VBP	Nanclares	Potencial	25.3	26.5	4.6%
1	Finca Las Mercedes	$\phi$ vs VBP	Nanclares	Lineal (Redondeado)	25.4	26.5	4.0%
1	Finca Las Mercedes	$\phi$ vs VBP	Nanclares	Lineal (Angular)	27.4	26.5	-3.2%

Muestra N°	Sitio	Correlación	Metodología VBP	Tipo	$\phi/\Delta\phi_{\text{correlación}} (^{\circ})$	$\phi/\Delta\phi_{\text{HCT}} (^{\circ})$	Error (%)
1	Finca Las Mercedes	$\phi$ vs $c_u$	N/A	Potencial	N/A	26.5	N/A
1	Finca Las Mercedes	$\Delta\phi$ vs VBP	Medley	Lineal (Esta investigación+Lindquist)	N/A	N/A	N/A
1	Finca Las Mercedes	$\Delta\phi$ vs VBP	Medley	Lineal (Esta investigación)	N/A	N/A	N/A
2	Finca Las Mercedes	$\phi$ vs VBP	Nanclares	Lineal	30.5	30.0	-1.6%
2	Finca Las Mercedes	$\phi$ vs VBP	Nanclares	Potencial	30.7	30.0	-2.3%
2	Finca Las Mercedes	$\phi$ vs VBP	Nanclares	Lineal (Redondeado)	29.3	30.0	2.5%
2	Finca Las Mercedes	$\phi$ vs VBP	Nanclares	Lineal (Angular)	32.0	30.0	-6.7%
2	Finca Las Mercedes	$\phi$ vs $c_u$	N/A	Potencial	N/A	30.0	N/A
2	Finca Las Mercedes	$\Delta\phi$ vs VBP	Medley	Lineal (Esta investigación+Lindquist)	7.1	4.9	-44.2%
2	Finca Las Mercedes	$\Delta\phi$ vs VBP	Medley	Lineal (Esta investigación)	6.1	4.9	-24%

Elaboración propia.

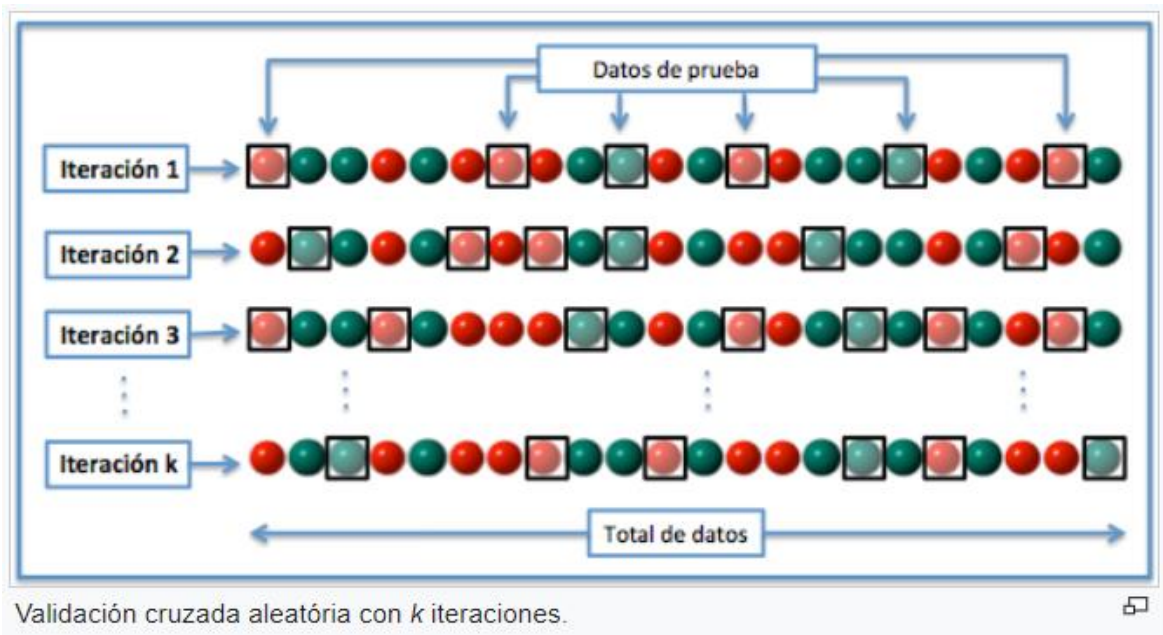
**Tabla 4-21.** Error promedio obtenido en la validación de las correlaciones propuestas.

Correlación	Metodología VBP	Tipo	Error promedio
$\phi$ vs VBP	Nanclares	Lineal	3.1%
$\phi$ vs VBP	Nanclares	Potencial	2.8%
$\phi$ vs VBP	Nanclares	Lineal (Redondeado)	2.8%
$\phi$ vs VBP	Nanclares	Lineal (Angular)	7.2%
$\phi$ vs $c_u$	N/A	Potencial	2.2%
$\Delta\phi$ vs VBP	Medley	Lineal (Esta investigación+Lindquist)	420.8%
$\Delta\phi$ vs VBP	Medley	Lineal (Esta investigación)	411.3%

Elaboración propia.

- **Validación cruzada aleatoria**

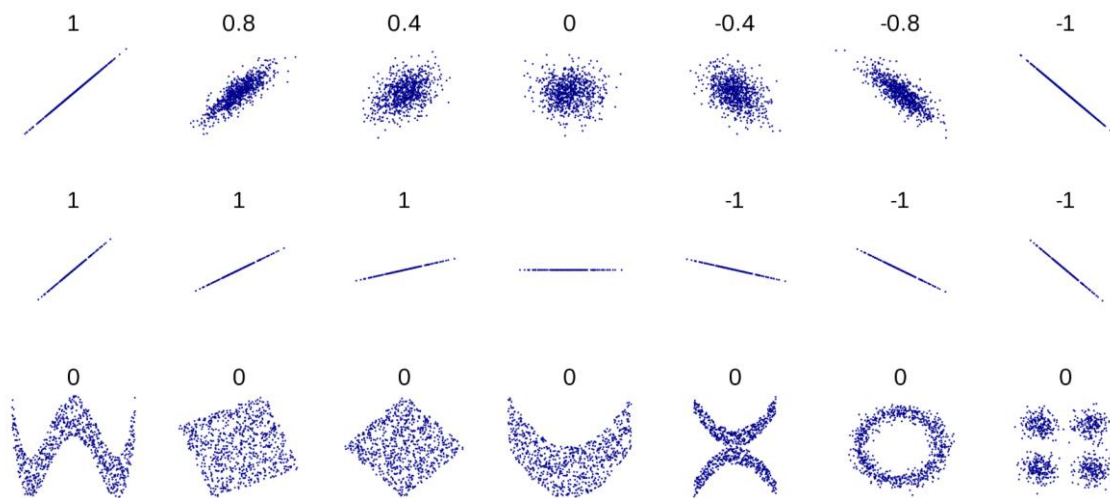
Para complementar la validación se hizo un análisis estadístico de las cinco (5) correlaciones con el mejor comportamiento (ver numeral anterior), denominado validación cruzada aleatoria. Este es un proceso iterativo en el cual, del total de datos obtenidos, se utilizar un porcentaje de los datos para hallar la regresión y el restante como validación. Se sugiere usar el 75% de los datos para la calibración del modelo (datos de entrenamiento) y el 25% para la validación (datos de prueba). El procedimiento iterativo consiste en ir variando, aleatoriamente, los datos de entrenamiento y los datos de prueba en cada iteración; por lo que se consiguen  $n$  número de regresiones y validaciones; siendo  $n$  la cantidad de iteraciones realizadas. En la Figura 4-82 se muestra un esquema del procedimiento seguido en la validación cruzada.



**Figura 4-82.** Esquema del procedimiento seguido en la validación cruzada. Tomado de (Fundación Wikimedia, Inc., 2019).

Al final de la validación, se obtuvo los coeficientes promedio ( $A$  y  $B$ ) que determinan la ecuación propuesta por la regresión, los coeficientes de correlación de Pearson " $R$ ", de determinación " $R^2$ " y el error cuadrático medio ( $RMSE$  por sus siglas en inglés).

Como se mencionó anteriormente, el coeficiente de Pearson es una medida del grado de covariación entre distintas variables relacionadas linealmente. Este varía entre  $-1$  y  $1$ ; en donde un  $R = 1$  indica que existe una correlación positiva perfecta; es decir hay una dependencia total entre las variables, denominada relación directa (si una variable aumenta, la otra también y lo hace en una proporción constante). Un  $R = 0$  indica que no existe relación lineal entre las variables. Finalmente, un  $R = -1$  indica una correlación negativa perfecta; es decir, cuando una variable aumenta, la otra disminuye en proporción constante. En la Figura 4-83 se muestra un ejemplo de lo expuesto anteriormente.



**Figura 4-83.** Ejemplo de coeficientes  $R$  para diferentes nubes de puntos. Tomado de (Fundación Wikimedia, Inc., 2019).

Es importante mencionar que el coeficiente de Pearson se determinó para la variable observada vs variable estimada; en donde un valor igual a 1 indica que variable observada es igual a la variable estimada. En todos los casos, la validación se hizo utilizando los resultados de los ensayos *HCT*. En la ecuación 17 se presenta la formulación para obtener el valor de  $R$ ; en donde  $x_i$  y  $y_i$  es el valor observado y estimado en la posición  $i$ , respectivamente; y  $n$  es el número de datos.

$$R = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (17)$$

El coeficiente de determinación  $R^2$  es simplemente el coeficiente de Pearson elevado al cuadrado. Este valor varía entre 0 (no hay relación entre las variables) y 1 (hay una relación perfecta entre las variables).

Finalmente, el  $RMSE$  representa la raíz cuadrada del segundo momento de la muestra de las diferencias entre los valores previstos y los valores observados o la media cuadrática de estas diferencias (Fundación Wikimedia, Inc., 2019). Este valor tiene las mismas unidades de las variables medidas y está dado por la siguiente ecuación.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (18)$$

En donde  $\hat{y}_i$  y  $y_i$  es el valor estimado y observado en la posición  $i$ , respectivamente; y  $n$  es el número de datos.

De manera análoga, la validación se hizo para las cinco (5) tendencias con el mejor comportamiento observado. En la Tabla 4-22 y Tabla 4-23 se presentan las regresiones analizadas y los datos utilizados para la validación, respectivamente.

**Tabla 4-22.** Codificación y tipo de regresiones para validación cruzada aleatoria.

Regresión N°	Correlación	Autor	Tipo	Ecuación
1	$\phi$ vs VBP	Nanclares	Potencial	$\varphi = A VBP^B$
2	$\phi$ vs VBP	Nanclares	Lineal	$\varphi = A VBP + B$
3	$\phi$ vs $c_u$	Nanclares	Potencial	$\varphi = A c_u^B$
4	$\phi$ vs VBP	Nanclares	Lineal (Angular)	$\varphi = A VBP + B$
5	$\phi$ vs VBP	Nanclares	Lineal (Redondeado)	$\varphi = A VBP + B$
6	$\Delta\phi$ vs VBP	Medley	Lineal (Esta investigación+Lindquist)	$\Delta\varphi = A VBP + B$

Elaboración propia

**Tabla 4-23.** Datos usados en la validación cruzada aleatoria por regresión.

Regresión 1 y 2		Regresión 3		Regresión 4		Regresión 5		Regresión 6	
VBP (%)	$\phi$ (°)	VBP (%)	$\phi$ (°)	$c_u$	$\phi$ (°)	VBP (%)	$\phi$ (°)	VBP (%)	$\Delta\phi$ (°)
63%	36.3	80%	46.34	6.36	36.3	80%	40.79	29%	3
65%	36.91	58%	42.82	7.14	36.91	58%	36.41	51%	11.5





<b>Regresión 1 y 2</b>		<b>Regresión 3</b>		<b>Regresión 4</b>		<b>Regresión 5</b>		<b>Regresión 6</b>	
<b>VBP (%)</b>	<b><math>\phi</math> (°)</b>	<b>VBP (%)</b>	<b><math>\phi</math> (°)</b>	<b>Cu</b>	<b><math>\phi</math> (°)</b>	<b>VBP (%)</b>	<b><math>\phi</math> (°)</b>	<b>VBP (%)</b>	<b><math>\Delta\phi</math> (°)</b>
85%	36	-	-	-	-	-	-	-	-
80%	35.5	-	-	-	-	-	-	-	-
31%	26.5	-	-	-	-	-	-	-	-
52%	30	-	-	-	-	-	-	-	-

\*Los datos en verde corresponden al ensayo HCT.

Elaboración propia

El proceso de validación se hizo programando el procedimiento descrito y las ecuaciones presentadas en párrafos anteriores. Para ello, se utilizó el lenguaje libre de programación *Python* (python TM, 2019).

A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

- **Regresión N°1**

En la Tabla 4-24 se presentan los resultados generados por el programa Python para realizar la validación cruzada. En total se ejecutaron 50 iteraciones en la cual se variaban los datos de prueba y entrenamiento, manteniendo la proporción 25 – 75%, respectivamente. Para cada iteración se obtuvieron los coeficientes *A* y *B* que definen la ecuación de la regresión, el coeficiente de Pearson “*R*”, el coeficiente de determinación “*R*<sup>2</sup>” y el error cuadrático medio “*RMSE*”. Los estadísticos (*R*, *R*<sup>2</sup> y *RMSE*) se calcularon tanto para la calibración, como para la validación.

**Tabla 4-24.** Resultados validación cruzada aleatoria para la regresión N°1.

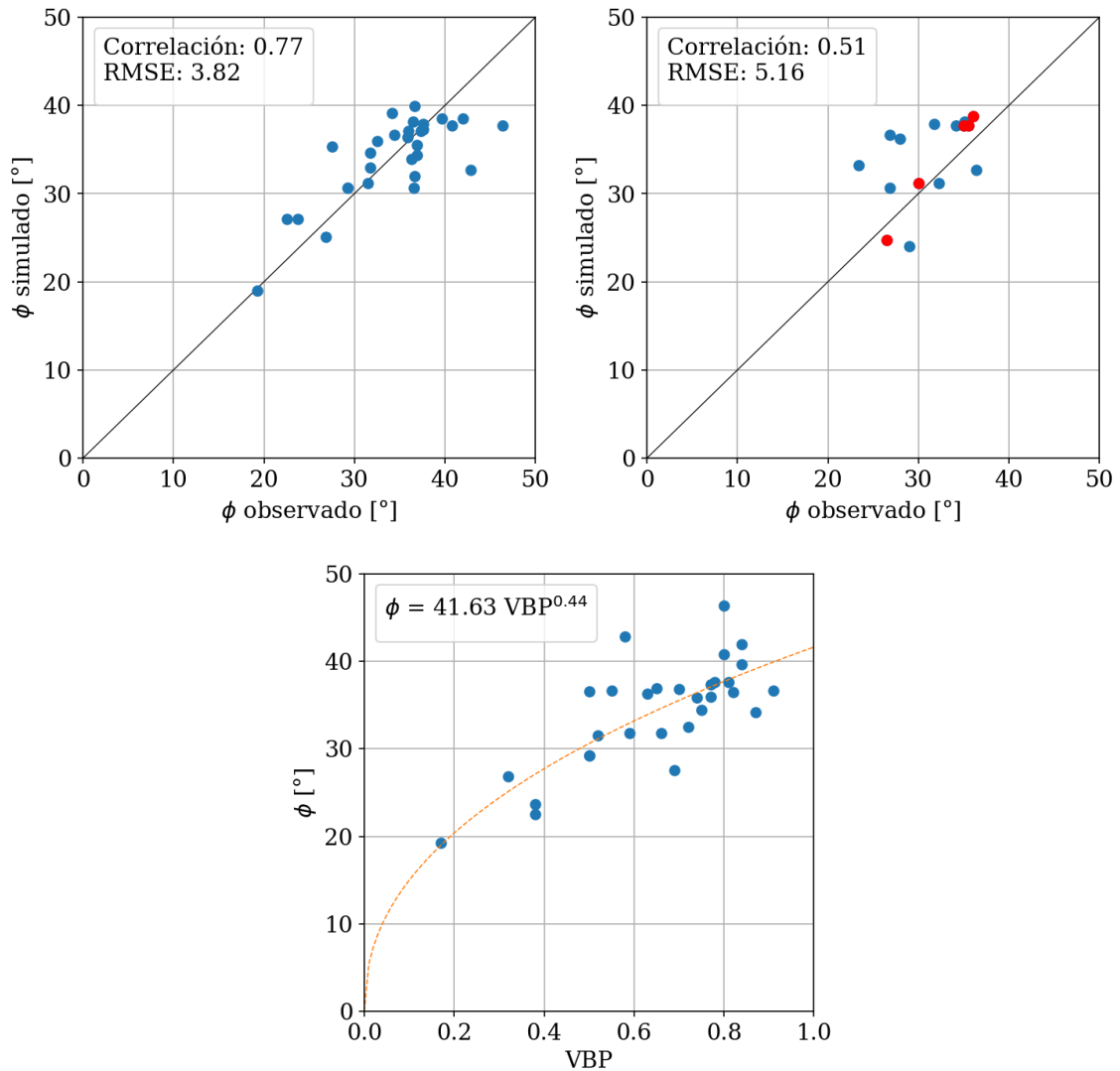
<b>Iteración</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>R</b>		<b>R<sup>2</sup></b>		<b>RMSE</b>	
			<b>Cal*</b>	<b>Val*</b>	<b>Cal*</b>	<b>Val*</b>	<b>Cal*</b>	<b>Val*</b>
1	40.130	0.393	0.702	0.646	0.492	0.418	4.451	3.542
2	39.456	0.389	0.684	0.649	0.468	0.421	4.721	2.696
3	37.684	0.336	0.619	0.765	0.384	0.585	4.429	3.901
4	38.442	0.354	0.622	0.756	0.387	0.572	4.206	4.131
5	38.298	0.353	0.716	0.570	0.512	0.325	3.730	5.004
6	38.379	0.357	0.627	0.842	0.393	0.708	4.803	2.573
7	38.498	0.336	0.604	0.860	0.365	0.740	4.671	2.871
8	40.307	0.383	0.642	0.804	0.412	0.646	4.290	4.005
9	38.549	0.364	0.737	0.573	0.543	0.329	3.686	5.042

Iteración	A	B	R		R <sup>2</sup>		RMSE	
			Cal*	Val*	Cal*	Val*	Cal*	Val*
10	38.412	0.369	0.672	0.699	0.452	0.488	4.518	3.548
11	38.094	0.334	0.648	0.759	0.420	0.576	4.210	4.156
12	38.791	0.344	0.721	0.611	0.520	0.374	3.537	5.158
13	39.901	0.396	0.579	0.778	0.335	0.606	4.487	3.412
14	39.724	0.365	0.664	0.774	0.441	0.599	4.350	3.756
15	39.922	0.389	0.658	0.783	0.433	0.614	4.656	2.920
16	38.771	0.369	0.667	0.714	0.445	0.509	4.564	3.252
17	41.626	0.444	0.771	0.507	0.595	0.257	3.820	5.162
18	39.089	0.391	0.653	0.735	0.427	0.540	4.496	3.483
19	38.785	0.376	0.663	0.683	0.440	0.466	4.360	3.810
20	38.306	0.288	0.549	0.782	0.302	0.612	3.948	4.693
21	39.383	0.380	0.592	0.892	0.350	0.795	4.816	2.295
22	37.991	0.339	0.618	0.852	0.382	0.726	4.693	3.038
23	38.828	0.324	0.551	0.845	0.304	0.715	4.537	3.290
24	39.069	0.340	0.572	0.832	0.327	0.692	4.564	3.171
25	38.537	0.366	0.680	0.654	0.462	0.427	4.465	3.591
26	39.141	0.335	0.635	0.765	0.404	0.586	4.263	3.951
27	39.045	0.415	0.698	0.665	0.488	0.442	4.300	4.194
28	39.317	0.344	0.648	0.741	0.420	0.550	4.256	3.958
29	39.226	0.369	0.703	0.608	0.494	0.370	4.133	4.170
30	39.210	0.378	0.654	0.769	0.427	0.591	4.756	2.555
31	36.981	0.324	0.631	0.785	0.398	0.617	3.669	5.560
32	38.907	0.370	0.652	0.723	0.425	0.523	4.689	2.824
33	39.486	0.424	0.681	0.809	0.463	0.655	4.785	2.819
34	38.785	0.391	0.624	0.760	0.390	0.578	4.033	4.581
35	39.936	0.408	0.656	0.758	0.430	0.574	4.485	3.452
36	40.186	0.395	0.678	0.778	0.460	0.605	4.668	2.942
37	39.370	0.377	0.720	0.559	0.518	0.312	4.065	4.310
38	37.841	0.337	0.651	0.699	0.424	0.488	4.119	4.458
39	38.722	0.342	0.642	0.745	0.413	0.556	4.196	4.056
40	40.350	0.437	0.654	0.866	0.427	0.750	4.801	2.643
41	39.714	0.365	0.668	0.759	0.446	0.576	4.373	3.700
42	39.674	0.368	0.682	0.705	0.465	0.497	4.335	3.772
43	39.238	0.419	0.619	0.797	0.384	0.635	4.340	4.054
44	37.244	0.289	0.512	0.847	0.262	0.717	4.236	4.304
45	40.201	0.404	0.746	0.464	0.556	0.215	4.085	4.343
46	39.209	0.358	0.580	0.827	0.337	0.683	4.586	3.073
47	38.995	0.396	0.717	0.539	0.514	0.290	4.289	4.040
48	38.257	0.358	0.675	0.650	0.455	0.423	4.301	4.034
49	39.563	0.381	0.657	0.706	0.432	0.499	4.194	4.057
50	39.217	0.383	0.760	0.442	0.577	0.196	3.651	5.025

Iteración	A	B	R		R <sup>2</sup>		RMSE	
			Cal*	Val*	Cal*	Val*	Cal*	Val*
<b>Prom</b>	<b>39.056</b>	<b>0.369</b>	<b>0.655</b>	<b>0.723</b>	<b>0.432</b>	<b>0.533</b>	<b>4.332</b>	<b>3.787</b>

\*Cal: Calibración \*Val: Validación

Elaboración propia

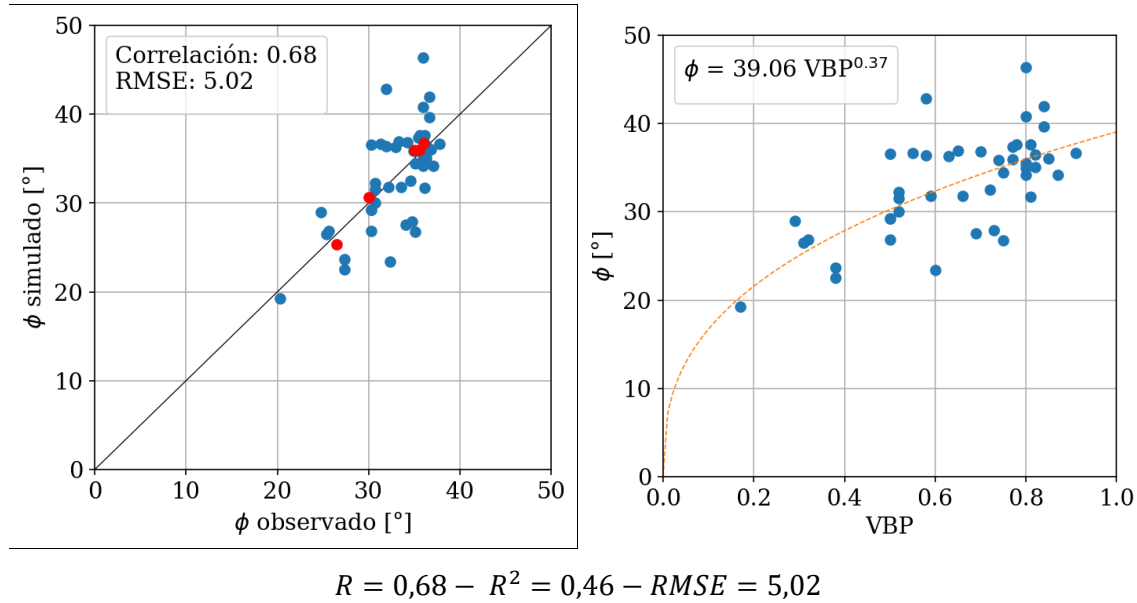


**Figura 4-84.** Iteración N°17 de la Regresión N°1.  $\phi_{\text{observado}}$  vs  $\phi_{\text{simulado}}$  con datos de entrenamiento (superior-izquierda) y datos de prueba (superior-derecha), y regresión (inferior).

Elaboración propia.

AEn la Figura 4-84 se presenta un ejemplo de los resultados obtenidos para la iteración N°17, seleccionada aleatoriamente.

Finalmente, al promediar todos los coeficientes obtenidos en las distintas iteraciones, se obtiene la ecuación potencial de la Regresión N°1, que relaciona el ángulo de fricción efectivo  $\phi'$  y la proporción volumétrica de bloques  $VBP$ , este último, obtenido por la metodología propuesta por (Nanclares, 2018). Los resultados se presentan en la Figura 4-85.



**Figura 4-85.** Regresión N°1.  $\phi_{\text{observado}}$  vs  $\phi_{\text{simulado}}$  (izquierda) y regresión (derecha) Elaboración propia.

$$\phi = 39,056VBP^{0,369} \quad (19)$$

- **Regresión N°2**

En este caso se procedió de manera análoga al procedimiento descrito para la Regresión N°1. En la Tabla 4-25 se presentan los resultados generados por el programa Python para realizar la validación cruzada.

**Tabla 4-25.** Resultados validación cruzada aleatoria para la regresión N°2.

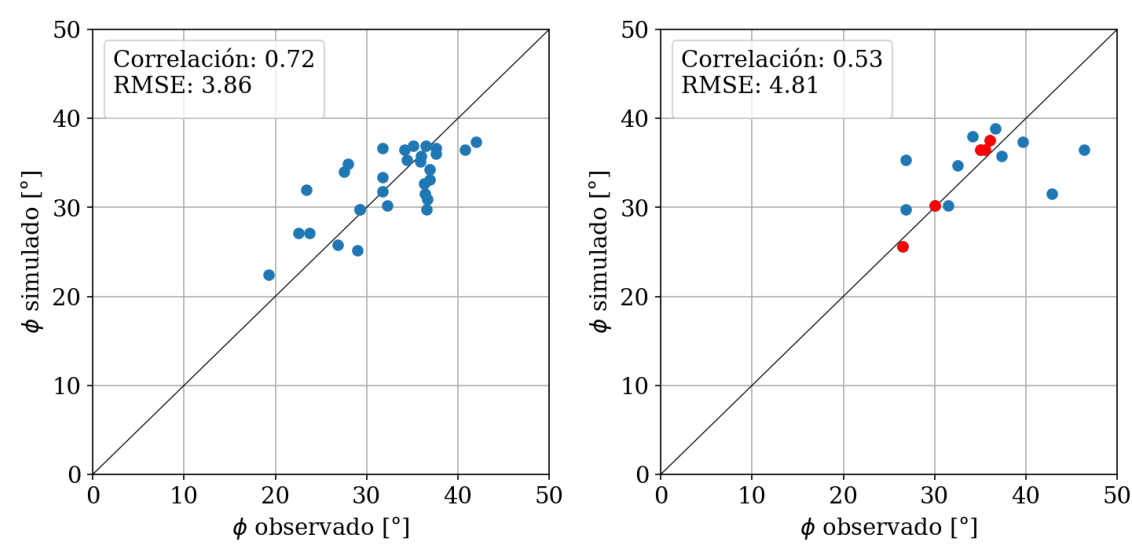
Iteración	A	B	R		R <sup>2</sup>		RMSE	
			Cal*	Val*	Cal*	Val*	Cal*	Val*
1	21.237	19.786	0.640	0.705	0.409	0.497	4.464	3.652
2	22.978	18.678	0.619	0.770	0.383	0.592	4.566	3.455
3	21.641	19.030	0.632	0.729	0.400	0.532	4.372	3.816

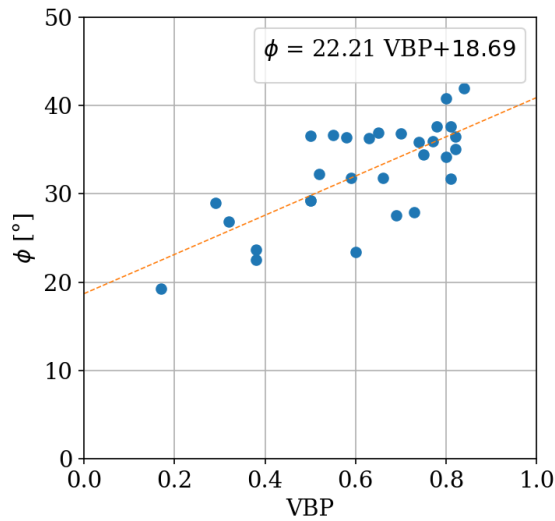
Iteración	A	B	R		R <sup>2</sup>		RMSE	
			Cal*	Val*	Cal*	Val*	Cal*	Val*
4	24.280	17.696	0.728	0.528	0.530	0.279	4.092	4.530
5	18.823	20.834	0.584	0.740	0.341	0.548	3.908	4.761
6	23.479	18.370	0.637	0.788	0.405	0.620	4.592	3.423
7	24.538	17.596	0.736	0.409	0.541	0.167	4.232	4.300
8	23.951	18.020	0.764	0.434	0.584	0.188	3.750	5.090
9	20.496	19.274	0.628	0.792	0.395	0.627	4.415	3.852
10	23.985	17.532	0.695	0.603	0.482	0.363	4.693	3.091
11	19.837	19.991	0.626	0.730	0.392	0.532	4.454	3.667
12	19.189	20.919	0.489	0.843	0.239	0.710	4.620	3.232
13	20.497	20.296	0.617	0.786	0.380	0.618	4.566	3.403
14	22.520	18.329	0.728	0.525	0.530	0.275	3.845	4.852
15	24.884	16.850	0.758	0.446	0.574	0.199	3.875	4.924
16	21.485	19.362	0.592	0.873	0.351	0.762	4.871	2.311
17	19.355	20.755	0.693	0.648	0.480	0.420	3.568	5.250
18	20.040	19.308	0.687	0.612	0.473	0.374	3.895	4.969
19	22.206	18.691	0.715	0.529	0.512	0.280	3.858	4.808
20	25.335	17.152	0.679	0.710	0.461	0.504	4.448	3.938
21	19.759	20.131	0.597	0.863	0.357	0.744	4.851	2.439
22	19.157	20.511	0.507	0.864	0.257	0.746	4.614	3.259
23	23.724	18.067	0.681	0.681	0.464	0.463	4.683	3.136
24	21.542	19.665	0.631	0.779	0.398	0.607	4.570	3.412
25	21.189	19.760	0.651	0.706	0.424	0.498	4.467	3.628
26	24.528	17.182	0.722	0.541	0.521	0.293	3.968	4.740
27	19.998	20.003	0.652	0.679	0.426	0.461	4.152	4.295
28	21.686	19.167	0.597	0.834	0.356	0.696	4.750	2.769
29	23.516	16.926	0.769	0.396	0.591	0.157	3.648	5.445
30	23.568	18.366	0.669	0.735	0.448	0.540	4.650	3.293
31	22.345	19.061	0.674	0.682	0.454	0.465	4.658	3.156
32	22.436	18.506	0.677	0.647	0.458	0.419	4.329	3.935
33	19.765	20.799	0.548	0.875	0.301	0.766	4.737	2.931
34	24.087	17.386	0.693	0.616	0.481	0.380	4.408	3.856
35	21.942	18.929	0.601	0.854	0.361	0.730	4.841	2.437
36	22.641	18.224	0.628	0.804	0.395	0.646	4.719	2.940
37	23.549	18.058	0.650	0.777	0.422	0.603	4.770	2.816
38	22.101	18.168	0.729	0.604	0.532	0.365	3.719	5.148
39	24.614	18.116	0.748	0.516	0.560	0.267	4.086	4.810
40	24.119	18.155	0.700	0.631	0.490	0.399	4.449	3.911
41	18.297	21.385	0.551	0.904	0.304	0.817	4.807	2.683
42	20.837	19.365	0.720	0.596	0.519	0.356	3.560	5.255
43	22.146	18.585	0.745	0.516	0.556	0.267	3.615	5.183

Iteración	A	B	R		R <sup>2</sup>		RMSE	
			Cal*	Val*	Cal*	Val*	Cal*	Val*
44	22.437	18.962	0.653	0.756	0.426	0.572	4.692	3.045
45	22.365	18.757	0.716	0.550	0.512	0.302	4.017	4.547
46	23.109	18.120	0.656	0.692	0.431	0.479	4.422	3.751
47	23.741	17.409	0.687	0.656	0.472	0.430	4.323	4.057
48	18.821	21.245	0.548	0.911	0.300	0.831	4.834	2.580
49	23.941	17.502	0.739	0.534	0.546	0.285	3.771	5.019
50	16.605	22.330	0.488	0.948	0.238	0.899	4.854	2.726
<b>Prom</b>	<b>21.986</b>	<b>18.946</b>	<b>0.657</b>	<b>0.687</b>	<b>0.437</b>	<b>0.491</b>	<b>4.341</b>	<b>3.851</b>

\*Cal: Calibración      \*Val: Validación

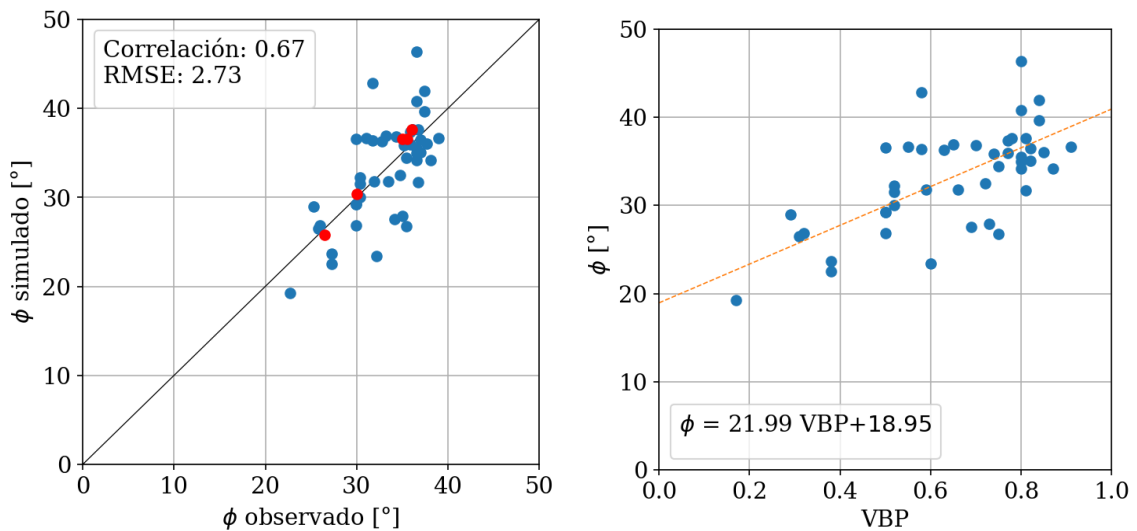
Elaboración propia





**Figura 4-86.** Iteración N°19 de la Regresión N°2.  $\phi_{\text{observado}}$  vs  $\phi_{\text{simulado}}$  con datos de entrenamiento (superior-izquierda) y datos de prueba (superior-derecha), y regresión (inferior).  
Elaboración propia.

En la Figura 4-86 se presenta un ejemplo de los resultados obtenidos para la iteración N°19, seleccionada aleatoriamente.



$$R = 0,67 - R^2 = 0,45 - RMSE = 2,73$$

**Figura 4-87.** Regresión N°2.  $\phi_{\text{observado}}$  vs  $\phi_{\text{simulado}}$  (izquierda) y regresión (derecha)  
Elaboración propia.

$$\varphi = 21,986VBP + 18,946 \quad (20)$$

Finalmente, al promediar todos los coeficientes obtenidos en las distintas iteraciones, se obtiene la ecuación lineal de la Regresión N°2, que relaciona el ángulo de fricción efectivo  $\varphi'$  y la proporción volumétrica de bloques  $VBP$ , este último, obtenido por la metodología propuesta por (Nanclares, 2018). La diferencia de ésta regresión, con la Regresión N°1 es que se propone una tendencia lineal. Los resultados se presentan en la Figura 4-87.

- **Regresión N°3**

En este caso se procedió de manera análoga al procedimiento descrito para la Regresión N°1. En la Tabla 4-26 se presentan los resultados generados por el programa Python para realizar la validación cruzada. En total se ejecutaron 50 iteraciones.

**Tabla 4-26.** Resultados validación cruzada aleatoria para la regresión N°3.

Iteración	A	B	R		R <sup>2</sup>		RMSE	
			Cal*	Val*	Cal*	Val*	Cal*	Val*
1	46.554	0.151	0.714	0.558	0.510	0.311	4.680	5.657
2	43.804	0.132	0.802	0.370	0.644	0.137	3.481	6.775
3	43.432	0.113	0.599	0.765	0.359	0.586	5.115	3.580
4	43.309	0.103	0.549	0.874	0.302	0.763	5.069	3.658
5	51.216	0.166	0.693	0.849	0.480	0.721	5.186	6.215
6	45.474	0.125	0.643	0.740	0.413	0.547	5.267	3.551
7	41.959	0.093	0.629	0.831	0.396	0.690	4.367	4.995
8	41.653	0.092	0.592	0.786	0.351	0.617	4.404	4.943
9	45.516	0.141	0.765	0.097	0.585	0.009	4.494	5.546
10	46.864	0.143	0.637	0.761	0.406	0.578	5.448	3.738
11	41.418	0.111	0.722	0.509	0.522	0.259	3.903	6.255
12	45.930	0.133	0.650	0.756	0.422	0.571	5.522	3.024
13	43.516	0.116	0.577	0.678	0.333	0.460	5.162	3.544
14	42.355	0.105	0.638	0.722	0.408	0.522	4.926	3.983
15	44.626	0.135	0.754	-0.547	0.569	0.300	4.492	5.482
16	48.115	0.150	0.662	0.834	0.438	0.695	5.484	4.151
17	44.668	0.134	0.792	-0.052	0.627	0.003	3.688	6.410
18	45.360	0.140	0.722	0.322	0.521	0.104	4.615	5.369
19	45.140	0.135	0.748	0.144	0.559	0.021	4.629	5.158
20	45.665	0.132	0.678	0.482	0.460	0.233	5.141	4.001
21	41.905	0.106	0.668	0.645	0.447	0.416	4.370	5.171
22	47.026	0.134	0.643	0.894	0.414	0.799	5.434	3.737
23	43.649	0.121	0.581	0.754	0.337	0.568	5.196	3.614
24	43.159	0.104	0.641	0.796	0.411	0.634	4.942	3.922



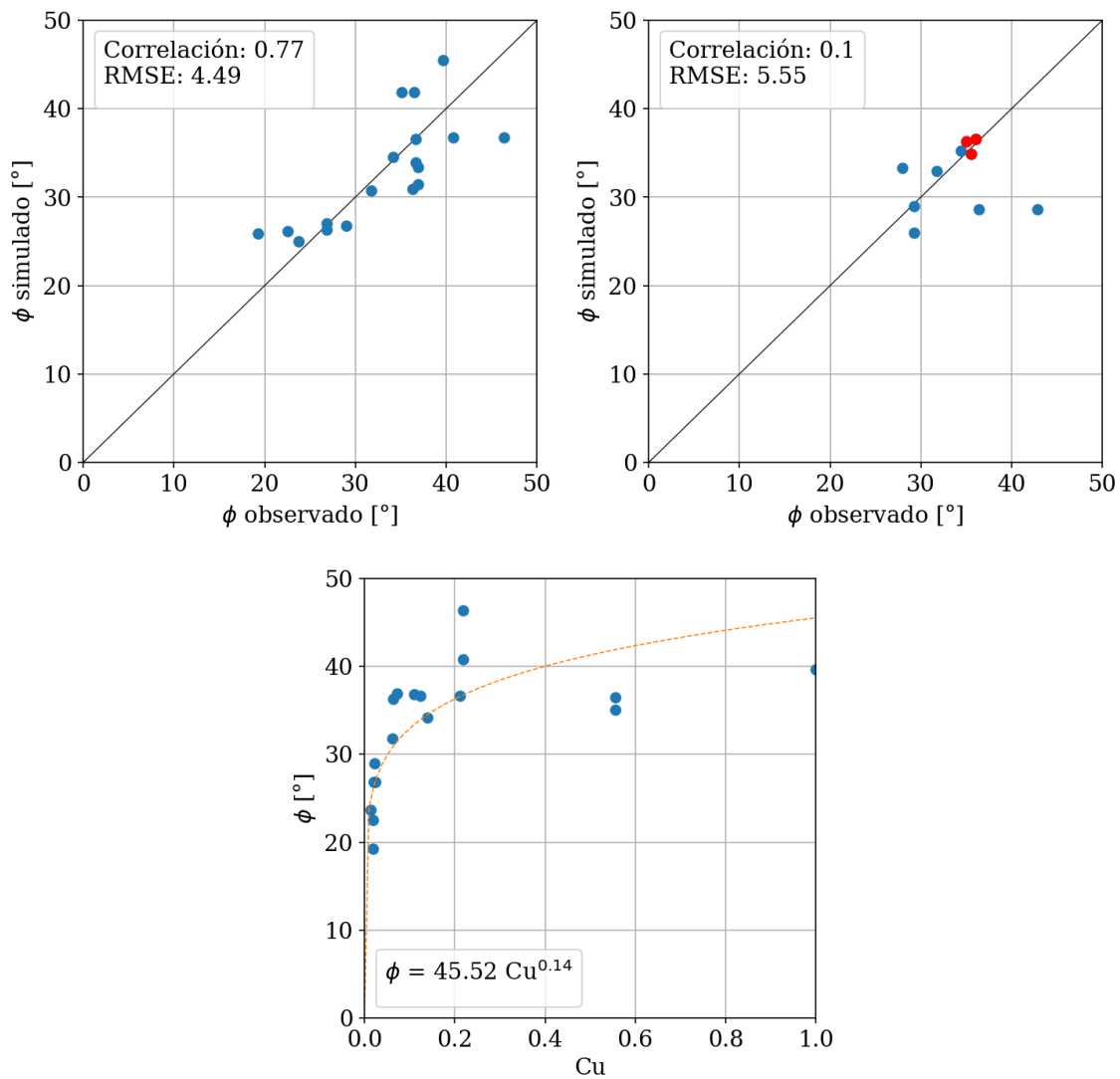
Iteración	A	B	R		R <sup>2</sup>		RMSE	
			Cal*	Val*	Cal*	Val*	Cal*	Val*
25	42.629	0.109	0.597	0.885	0.356	0.782	5.510	2.341
26	53.256	0.176	0.700	0.594	0.491	0.352	4.489	8.085
27	44.511	0.125	0.722	0.534	0.522	0.285	4.111	5.603
28	44.384	0.122	0.614	0.818	0.377	0.670	5.537	2.462
29	41.116	0.086	0.524	0.901	0.274	0.812	4.958	3.966
30	49.026	0.151	0.661	0.813	0.437	0.660	5.371	4.812
31	44.469	0.108	0.554	0.800	0.307	0.640	4.101	5.639
32	43.203	0.106	0.617	0.731	0.381	0.534	4.604	4.594
33	43.284	0.104	0.640	0.770	0.410	0.593	4.451	4.880
34	40.219	0.085	0.688	0.736	0.474	0.542	3.099	6.630
35	41.347	0.081	0.511	0.876	0.261	0.768	4.677	4.697
36	43.291	0.110	0.548	0.727	0.300	0.528	4.615	4.592
37	42.038	0.084	0.565	0.808	0.319	0.652	4.519	5.088
38	43.605	0.121	0.743	0.305	0.552	0.093	4.327	5.299
39	44.364	0.116	0.641	0.724	0.411	0.524	5.165	3.525
40	49.153	0.152	0.703	0.581	0.495	0.337	5.181	5.230
41	41.732	0.100	0.607	0.809	0.368	0.654	4.762	4.378
42	42.908	0.124	0.721	0.204	0.520	0.042	4.562	5.395
43	47.112	0.143	0.649	0.692	0.421	0.478	5.340	4.058
44	53.522	0.177	0.726	0.711	0.527	0.506	4.777	7.921
45	46.688	0.135	0.642	0.787	0.412	0.619	5.374	3.723
46	42.218	0.105	0.601	0.847	0.361	0.718	5.312	3.014
47	42.821	0.098	0.484	0.940	0.234	0.884	5.285	3.048
48	47.177	0.138	0.584	0.944	0.340	0.892	5.485	3.648
49	45.629	0.146	0.743	0.406	0.552	0.165	4.433	5.884
50	44.171	0.134	0.725	0.541	0.526	0.293	4.010	6.206
<b>Prom</b>	<b>44.724</b>	<b>0.123</b>	<b>0.652</b>	<b>0.641</b>	<b>0.431</b>	<b>0.491</b>	<b>4.781</b>	<b>4.744</b>

\*Cal: Calibración      \*Val: Validación

Elaboración propia

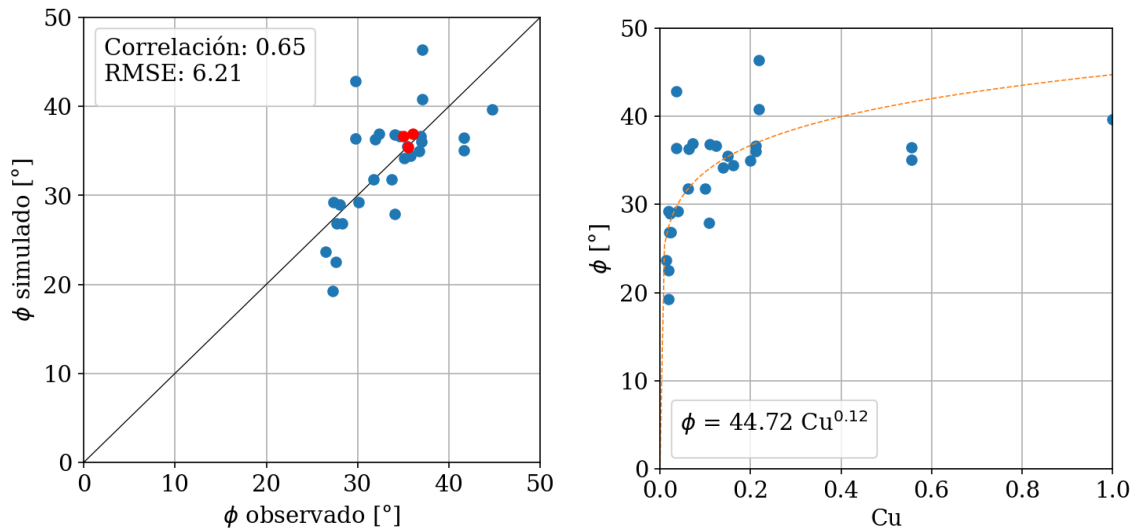
En la Figura 4-88 se presenta un ejemplo de los resultados obtenidos para la iteración N°9, seleccionada aleatoriamente.

Finalmente, al promediar todos los coeficientes obtenidos en las distintas iteraciones, se obtiene la ecuación potencial de la Regresión N°3, que relaciona el ángulo de fricción efectivo  $\varphi'$  y el coeficiente de uniformidad  $c_u$ . Los resultados se presentan en la Figura 4-89.



**Figura 4-88.** Iteración N°9 de la Regresión N°3.  $\phi_{\text{observado}}$  vs  $\phi_{\text{simulado}}$  con datos de entrenamiento (superior-izquierda) y datos de prueba (superior-derecha), y regresión (inferior).

Elaboración propia.



$$R = 0,65 - R^2 = 0,42 - RMSE = 6,21$$

**Figura 4-89.** Regresión N°3.  $\phi_{\text{observado}}$  vs  $\phi_{\text{simulado}}$  (izquierda) y regresión (derecha) Elaboración propia.

$$\varphi = 47,724c_u^{0,123} \quad (21)$$

• **Regresión N°4**

En este caso se procedió de manera análoga al procedimiento descrito para la Regresión N°1. En la Tabla 4-27 se presentan los resultados generados por el programa Python para realizar la validación cruzada.

**Tabla 4-27.** Resultados validación cruzada aleatoria para la regresión N°4.

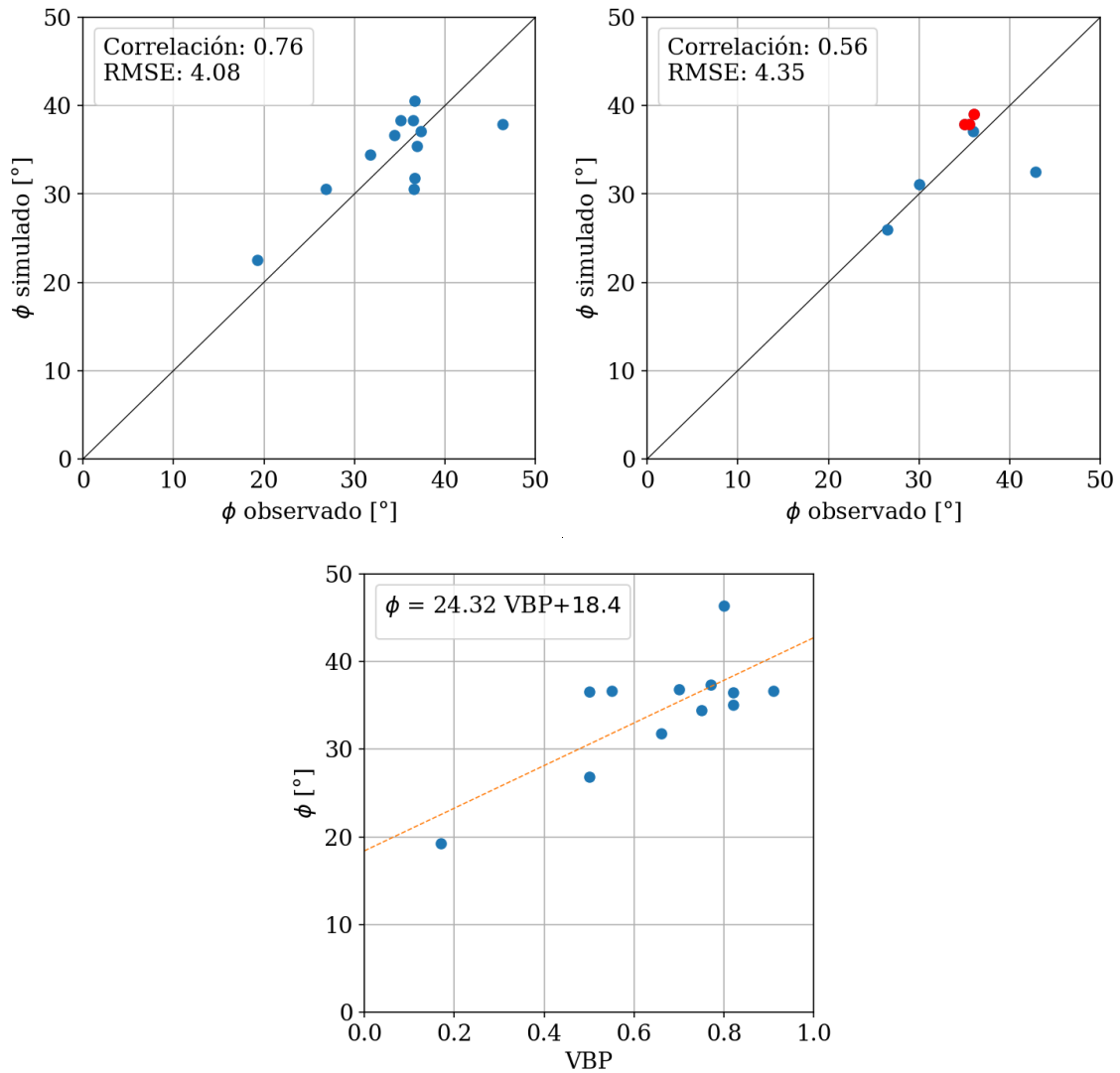
Iteración	A	B	R		R <sup>2</sup>		RMSE	
			Cal*	Val*	Cal*	Val*	Cal*	Val*
1	18.631	23.102	0.579	0.887	0.335	0.786	4.514	3.776
2	19.525	22.502	0.576	0.852	0.331	0.726	4.421	3.910
3	20.702	20.929	0.611	0.800	0.373	0.641	4.420	3.594
4	26.385	16.732	0.842	-0.583	0.709	0.340	3.559	5.276
5	22.175	20.904	0.660	0.944	0.435	0.891	4.781	3.223
6	25.231	18.640	0.755	0.126	0.570	0.016	4.651	3.592
7	23.226	19.358	0.721	0.512	0.520	0.262	4.838	2.618
8	12.617	25.850	0.541	0.776	0.292	0.603	2.659	6.438
9	22.199	20.377	0.673	0.802	0.453	0.644	4.705	3.065
10	20.735	21.529	0.588	0.869	0.345	0.755	4.527	3.564
11	26.158	17.703	0.720	0.783	0.518	0.614	4.690	3.464

Iteración	A	B	R		R <sup>2</sup>		RMSE	
			Cal*	Val*	Cal*	Val*	Cal*	Val*
12	24.278	18.784	0.803	0.086	0.644	0.007	3.959	4.570
13	20.498	19.735	0.823	-0.369	0.678	0.136	3.015	5.901
14	26.427	17.526	0.814	-0.346	0.663	0.119	3.832	4.982
15	21.420	19.589	0.820	0.190	0.673	0.036	3.129	5.580
16	16.335	25.140	0.525	0.989	0.276	0.979	4.495	4.407
17	19.189	22.930	0.570	0.962	0.324	0.926	4.622	3.661
18	21.420	19.589	0.820	0.190	0.673	0.036	3.129	5.580
19	20.374	21.282	0.719	0.638	0.517	0.408	4.079	4.247
20	25.497	18.627	0.763	0.561	0.583	0.315	4.409	4.207
21	26.269	18.252	0.713	0.928	0.508	0.861	4.757	3.710
22	25.331	18.268	0.752	-0.288	0.565	0.083	4.685	3.367
23	23.318	19.754	0.680	0.913	0.462	0.833	4.960	2.440
24	24.643	18.300	0.800	0.006	0.640	0.000	3.965	4.557
25	24.526	18.676	0.698	0.813	0.487	0.662	4.829	2.837
26	15.540	25.802	0.516	0.994	0.266	0.988	4.300	4.926
27	26.385	16.732	0.842	-0.583	0.709	0.340	3.559	5.276
28	24.281	19.095	0.814	0.271	0.663	0.073	3.714	4.994
29	15.201	25.476	0.415	0.898	0.173	0.806	4.517	4.184
30	20.837	21.984	0.567	0.976	0.322	0.952	4.605	3.781
31	22.077	19.418	0.723	0.636	0.522	0.404	4.031	4.390
32	21.889	19.349	0.824	-0.403	0.679	0.163	3.114	5.575
33	17.118	24.522	0.533	0.990	0.284	0.980	4.571	4.104
34	22.175	20.904	0.660	0.944	0.435	0.891	4.781	3.223
35	22.120	19.597	0.763	0.223	0.582	0.050	3.974	4.430
36	24.729	19.596	0.734	0.934	0.539	0.872	4.619	4.107
37	20.633	21.295	0.717	0.687	0.514	0.472	4.111	4.232
38	18.252	23.921	0.557	0.991	0.310	0.982	4.482	4.315
39	22.778	19.699	0.725	0.029	0.525	0.001	4.203	4.072
40	24.547	18.904	0.711	0.798	0.506	0.637	4.739	3.195
41	24.374	18.086	0.786	0.519	0.618	0.270	3.699	4.929
42	27.237	17.910	0.752	0.164	0.566	0.027	4.690	4.244
43	24.421	19.178	0.712	-0.440	0.508	0.194	4.947	2.727
44	28.045	16.653	0.823	-0.843	0.678	0.710	3.744	5.349
45	24.319	18.405	0.759	0.558	0.576	0.311	4.081	4.349
46	26.567	17.581	0.742	0.739	0.551	0.546	4.567	3.853
47	24.671	18.186	0.791	-0.890	0.626	0.793	4.038	4.445
48	22.643	20.287	0.687	0.794	0.472	0.630	4.640	3.360
49	21.365	19.840	0.746	0.434	0.556	0.189	4.014	4.421
50	20.443	20.944	0.712	0.547	0.508	0.299	4.288	3.857
<b>Prom</b>	<b>22.395</b>	<b>20.149</b>	<b>0.704</b>	<b>0.440</b>	<b>0.505</b>	<b>0.485</b>	<b>4.233</b>	<b>4.178</b>

\*Cal: Calibración

\*Val: Validación

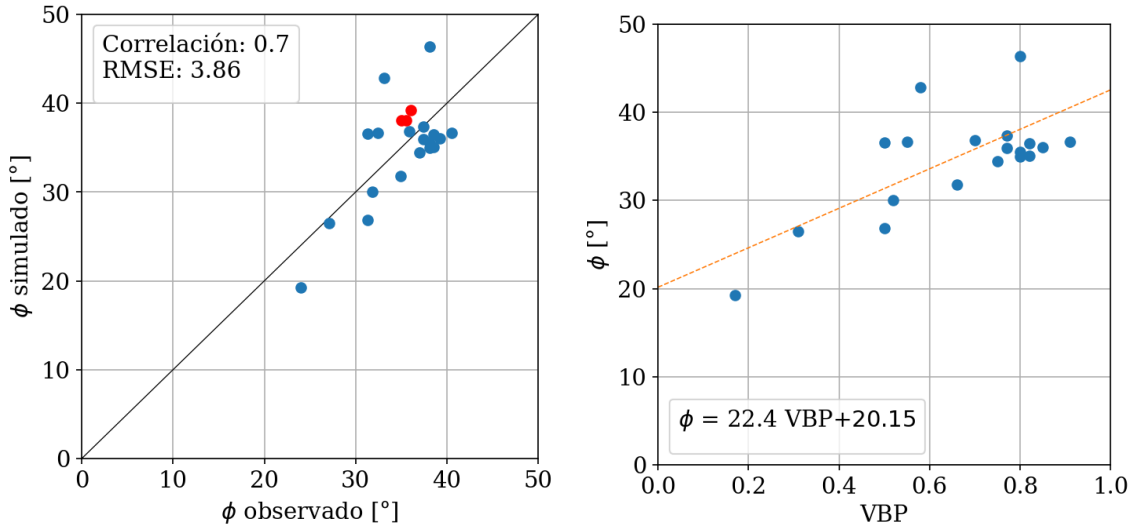
## Elaboración propia



**Figura 4-90.** Iteración N°45 de la Regresión N°4.  $\phi_{\text{observado}}$  vs  $\phi_{\text{simulado}}$  con datos de entrenamiento (superior-izquierda) y datos de prueba (superior-derecha), y regresión (inferior).

Elaboración propia.

En la Figura 4-90 se presenta un ejemplo de los resultados obtenidos para la iteración N°45, seleccionada aleatoriamente.



$$R = 0,70 - R^2 = 0,49 - RMSE = 3,86$$

**Figura 4-91.** Regresión N°4.  $\phi_{\text{observado}}$  vs  $\phi_{\text{simulado}}$  (izquierda) y regresión (derecha) Elaboración propia.

$$\phi = 22,395VBP + 20,149 - \text{Bloques angulares} \quad (22)$$

Finalmente, al promediar todos los coeficientes obtenidos en las distintas iteraciones, se obtiene la ecuación lineal de la Regresión N°4, que relaciona el ángulo de fricción efectivo  $\phi'$  y la proporción volumétrica de bloques  $VBP$ , este último, obtenido por la metodología propuesta por (Nanclares, 2018). La diferencia de ésta regresión, con la Regresión N°1 es que esta ecuación aplica para bloques angulares y subangulares. Los resultados se presentan en la Figura 4-91.

- **Regresión N°5**

En este caso se procedió de manera análoga al procedimiento descrito para la Regresión N°1. En la Tabla 4-28 se presentan los resultados generados por el programa Python para realizar la validación cruzada.

**Tabla 4-28.** Resultados validación cruzada aleatoria para la regresión N°5.

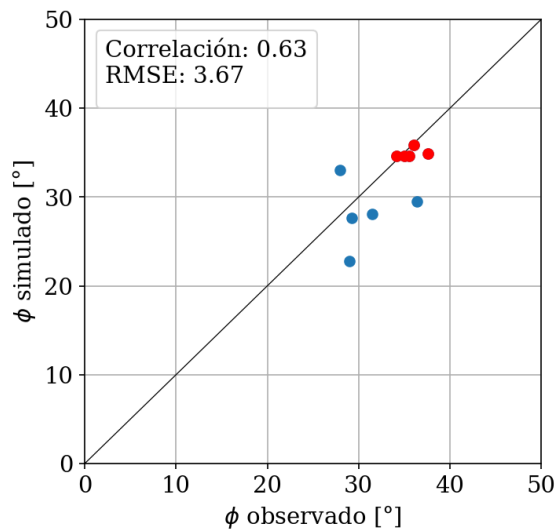
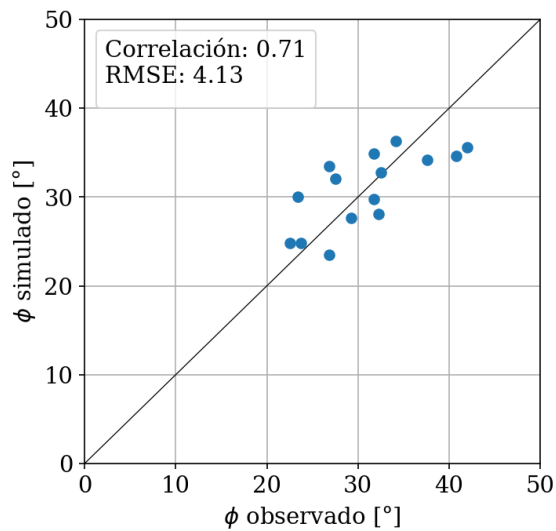
Iteración	A	B	R		R <sup>2</sup>		RMSE	
			Cal*	Val*	Cal*	Val*	Cal*	Val*
1	16.956	21.366	0.588	0.785	0.346	0.616	4.007	3.703
2	25.844	14.469	0.717	0.667	0.514	0.445	3.953	4.164
3	15.852	21.650	0.556	0.821	0.309	0.674	4.173	3.375

Iteración	A	B	R		R <sup>2</sup>		RMSE	
			Cal*	Val*	Cal*	Val*	Cal*	Val*
4	17.922	19.580	0.563	0.867	0.317	0.751	4.712	2.064
5	11.879	23.832	0.467	0.858	0.218	0.737	3.769	4.430
6	22.667	16.685	0.628	0.885	0.394	0.783	4.641	2.368
7	20.987	18.511	0.726	0.411	0.528	0.169	3.787	3.949
8	21.699	18.072	0.673	0.677	0.452	0.459	4.261	3.186
9	15.272	22.120	0.591	0.810	0.349	0.657	3.794	4.042
10	15.323	20.646	0.584	0.790	0.341	0.624	3.902	4.309
11	18.126	19.894	0.624	0.712	0.390	0.507	4.238	3.128
12	21.447	18.040	0.638	0.736	0.408	0.542	4.533	2.492
13	12.978	22.229	0.505	0.608	0.255	0.370	3.813	4.593
14	14.514	21.815	0.484	0.883	0.235	0.780	4.444	3.076
15	13.768	22.503	0.538	0.822	0.289	0.675	3.887	4.068
16	15.525	21.354	0.496	0.830	0.246	0.689	4.414	2.959
17	24.546	16.456	0.737	0.558	0.542	0.311	3.747	4.315
18	24.730	16.889	0.729	0.437	0.531	0.191	4.004	4.264
19	17.673	20.397	0.565	0.881	0.320	0.777	4.643	2.106
20	19.005	19.897	0.686	0.665	0.471	0.442	3.665	4.112
21	16.087	20.778	0.537	0.928	0.288	0.861	4.640	2.426
22	17.224	21.108	0.630	0.766	0.397	0.587	3.991	3.687
23	20.388	18.132	0.597	0.768	0.356	0.589	4.327	3.013
24	16.088	20.826	0.546	0.706	0.299	0.498	4.309	3.193
25	15.432	20.709	0.538	0.846	0.289	0.716	4.096	3.925
26	16.349	21.459	0.606	0.784	0.367	0.614	3.854	3.888
27	19.578	18.883	0.615	0.794	0.378	0.631	4.758	1.654
28	23.339	15.986	0.705	0.631	0.497	0.398	4.126	3.671
29	22.158	17.456	0.652	0.716	0.425	0.513	4.254	3.181
30	16.046	20.706	0.549	0.885	0.301	0.783	4.505	2.840
31	19.128	19.114	0.635	0.720	0.403	0.519	4.186	3.238
32	16.814	21.588	0.673	0.798	0.453	0.636	3.259	4.726
33	19.087	19.358	0.650	0.526	0.422	0.277	4.168	3.245
34	14.606	21.642	0.505	0.811	0.255	0.658	4.284	3.442
35	17.486	20.115	0.532	0.914	0.283	0.835	4.659	2.131
36	16.002	21.854	0.589	0.847	0.347	0.717	4.053	3.638
37	19.981	18.939	0.653	0.672	0.426	0.452	4.065	3.446
38	11.895	23.126	0.495	0.771	0.246	0.595	3.582	4.876
39	22.033	17.924	0.683	0.633	0.467	0.401	4.221	3.307
40	11.107	23.069	0.429	0.749	0.184	0.561	3.801	5.080
41	16.812	20.356	0.540	0.807	0.292	0.651	4.297	3.167
42	13.492	21.460	0.464	0.746	0.215	0.556	3.858	4.802
43	21.176	18.207	0.660	0.683	0.436	0.466	4.384	2.847

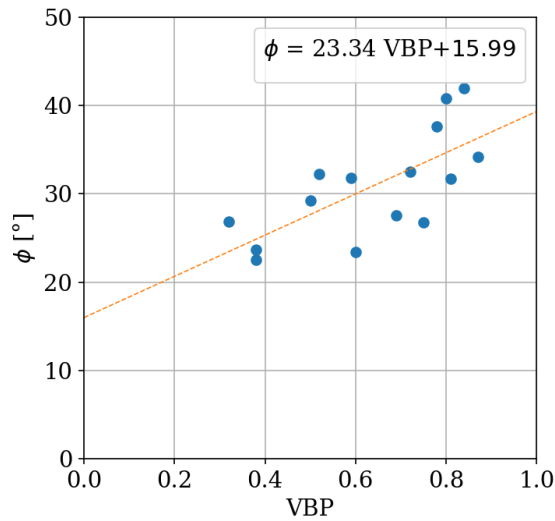
Iteración	A	B	R		R <sup>2</sup>		RMSE	
			Cal*	Val*	Cal*	Val*	Cal*	Val*
44	14.410	21.203	0.500	0.717	0.250	0.514	4.307	3.797
45	19.053	19.782	0.584	0.826	0.341	0.682	4.444	2.695
46	18.081	19.524	0.682	0.363	0.466	0.132	3.590	4.251
47	23.394	17.506	0.678	0.453	0.459	0.205	4.336	3.427
48	21.683	18.359	0.685	0.603	0.470	0.364	4.321	3.173
49	25.446	14.504	0.678	0.800	0.460	0.639	4.243	3.758
50	22.360	18.737	0.795	0.629	0.631	0.396	3.298	5.130
<b>Prom</b>	<b>18.269</b>	<b>19.776</b>	<b>0.604</b>	<b>0.732</b>	<b>0.371</b>	<b>0.553</b>	<b>4.132</b>	<b>3.527</b>

\*Cal: Calibración      \*Val: Validación

Elaboración propia

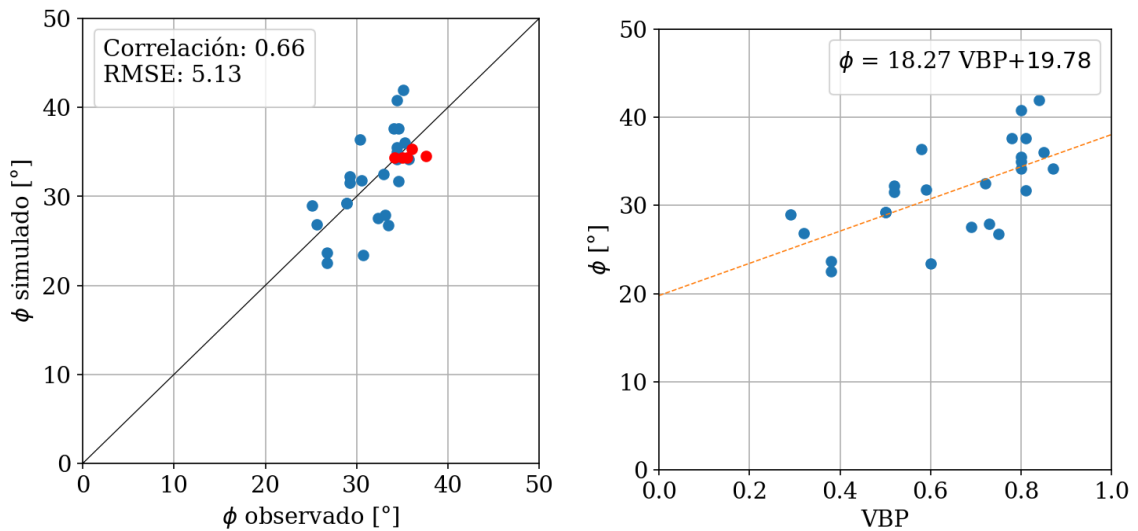






**Figura 4-92.** Iteración N°28 de la Regresión N°5.  $\phi_{\text{observado}}$  vs  $\phi_{\text{simulado}}$  con datos de entrenamiento (superior-izquierda) y datos de prueba (superior-derecha), y regresión (inferior).  
Elaboración propia.

En la Figura 4-92 se presenta un ejemplo de los resultados obtenidos para la iteración N°28, seleccionada aleatoriamente.



$$R = 0,66 - R^2 = 0,44 - RMSE = 5,13$$

**Figura 4-93.** Regresión N°5.  $\phi_{\text{observado}}$  vs  $\phi_{\text{simulado}}$  (izquierda) y regresión (derecha)  
Elaboración propia.

$$\phi = 18,269VBP + 19,776 - \text{Bloques redondeados} \quad (23)$$

Finalmente, al promediar todos los coeficientes obtenidos en las distintas iteraciones, se obtiene la ecuación lineal de la Regresión N°5, que relaciona el ángulo de fricción efectivo  $\varphi'$  y la proporción volumétrica de bloques  $VBP$ , este último, obtenido por la metodología propuesta por (Nanclares, 2018). La diferencia de ésta regresión, con la Regresión N°1 es que esta ecuación aplica para bloques redondeados y subredondeados. Los resultados se presentan en la Figura 4-93.

- **Regresión N°6**

En este caso se procedió de manera análoga al procedimiento descrito para la Regresión N°1. En la Tabla 4-28 se presentan los resultados generados por el programa Python para realizar la validación cruzada.

**Tabla 4-29.** Resultados validación cruzada aleatoria para la regresión N°6.

Iteración	A	B	R		R <sup>2</sup>		RMSE	
			Cal*	Val*	Cal*	Val*	Cal*	Val*
1	36.998	-9.149	0.875	0.780	0.766	0.609	2.858	3.709
2	32.398	-6.897	0.837	0.438	0.700	0.192	2.961	3.475
3	31.883	-6.781	0.840	0.851	0.706	0.724	2.730	3.739
4	34.730	-8.707	0.915	0.691	0.838	0.478	2.201	4.201
5	35.061	-8.045	0.855	0.868	0.732	0.753	2.509	4.149
6	30.641	-6.189	0.852	0.871	0.726	0.759	2.949	3.467
7	33.092	-7.828	0.855	0.792	0.731	0.627	2.783	3.526
8	25.568	-4.442	0.824	0.906	0.679	0.822	2.449	4.345
9	29.426	-6.616	0.918	0.802	0.843	0.643	1.712	4.723
10	34.701	-8.246	0.884	0.753	0.781	0.566	2.627	3.828
11	41.996	-12.020	0.927	0.673	0.859	0.453	2.272	4.621
12	40.202	-11.471	0.907	0.740	0.823	0.548	2.366	4.342
13	32.015	-6.949	0.828	0.826	0.686	0.682	3.048	3.222
14	26.097	-4.400	0.776	0.903	0.603	0.815	2.702	4.018
15	36.654	-8.969	0.890	0.657	0.792	0.432	2.673	3.937
16	37.002	-9.023	0.865	0.856	0.748	0.733	2.879	3.753
17	32.346	-6.859	0.829	0.886	0.687	0.784	2.876	3.606
18	30.501	-6.193	0.872	0.812	0.761	0.660	2.528	3.993
19	31.850	-7.143	0.868	0.767	0.754	0.589	2.848	3.461
20	31.807	-6.741	0.827	0.860	0.683	0.740	2.760	3.703
21	34.952	-7.855	0.869	0.818	0.756	0.670	2.796	3.899
22	33.256	-7.361	0.834	0.882	0.695	0.778	3.159	3.111
23	33.860	-8.022	0.884	0.566	0.782	0.320	2.745	3.610

Iteración	A	B	R		R <sup>2</sup>		RMSE	
			Cal*	Val*	Cal*	Val*	Cal*	Val*
24	28.984	-5.480	0.845	0.893	0.714	0.797	2.823	3.698
25	28.789	-5.416	0.834	0.855	0.696	0.731	2.744	3.805
26	28.442	-5.225	0.744	0.919	0.554	0.845	2.697	3.895
27	27.864	-4.828	0.794	0.882	0.630	0.777	2.909	3.706
28	37.719	-10.137	0.909	0.720	0.826	0.518	2.376	4.148
29	32.743	-7.712	0.893	0.683	0.798	0.466	2.514	3.866
30	35.042	-8.175	0.893	0.746	0.798	0.557	2.684	3.871
31	33.101	-6.684	0.897	0.761	0.805	0.578	2.522	4.403
32	29.141	-5.381	0.838	0.893	0.703	0.797	2.887	3.676
33	32.941	-7.715	0.902	0.616	0.814	0.380	2.403	3.997
34	34.323	-8.149	0.885	-0.019	0.784	0.000	2.572	3.860
35	37.062	-10.048	0.891	0.723	0.793	0.523	2.567	3.910
36	31.910	-6.952	0.808	0.875	0.653	0.766	2.731	3.677
37	33.811	-8.259	0.905	0.621	0.819	0.385	2.503	3.877
38	35.802	-9.157	0.867	0.720	0.751	0.518	2.735	3.638
39	32.681	-7.097	0.822	0.811	0.675	0.658	2.981	3.405
40	31.072	-6.381	0.791	0.902	0.626	0.814	2.824	3.638
41	36.099	-9.321	0.884	0.640	0.781	0.409	2.751	3.626
42	34.781	-8.261	0.826	0.856	0.682	0.732	2.768	3.659
43	34.750	-8.249	0.895	0.411	0.802	0.169	2.628	3.836
44	34.128	-7.860	0.911	0.380	0.829	0.144	2.504	4.005
45	34.025	-7.945	0.849	0.745	0.721	0.555	3.123	3.073
46	34.270	-8.104	0.872	0.741	0.760	0.548	2.806	3.564
47	29.243	-5.325	0.849	0.901	0.720	0.811	2.767	3.885
48	30.841	-6.453	0.857	0.802	0.734	0.643	2.652	3.803
49	31.795	-6.981	0.875	0.705	0.766	0.496	2.741	3.641
50	32.810	-7.043	0.855	0.847	0.732	0.718	2.668	3.897
<b>Prom</b>	<b>33.024</b>	<b>-7.485</b>	<b>0.860</b>	<b>0.753</b>	<b>0.742</b>	<b>0.594</b>	<b>2.686</b>	<b>3.810</b>

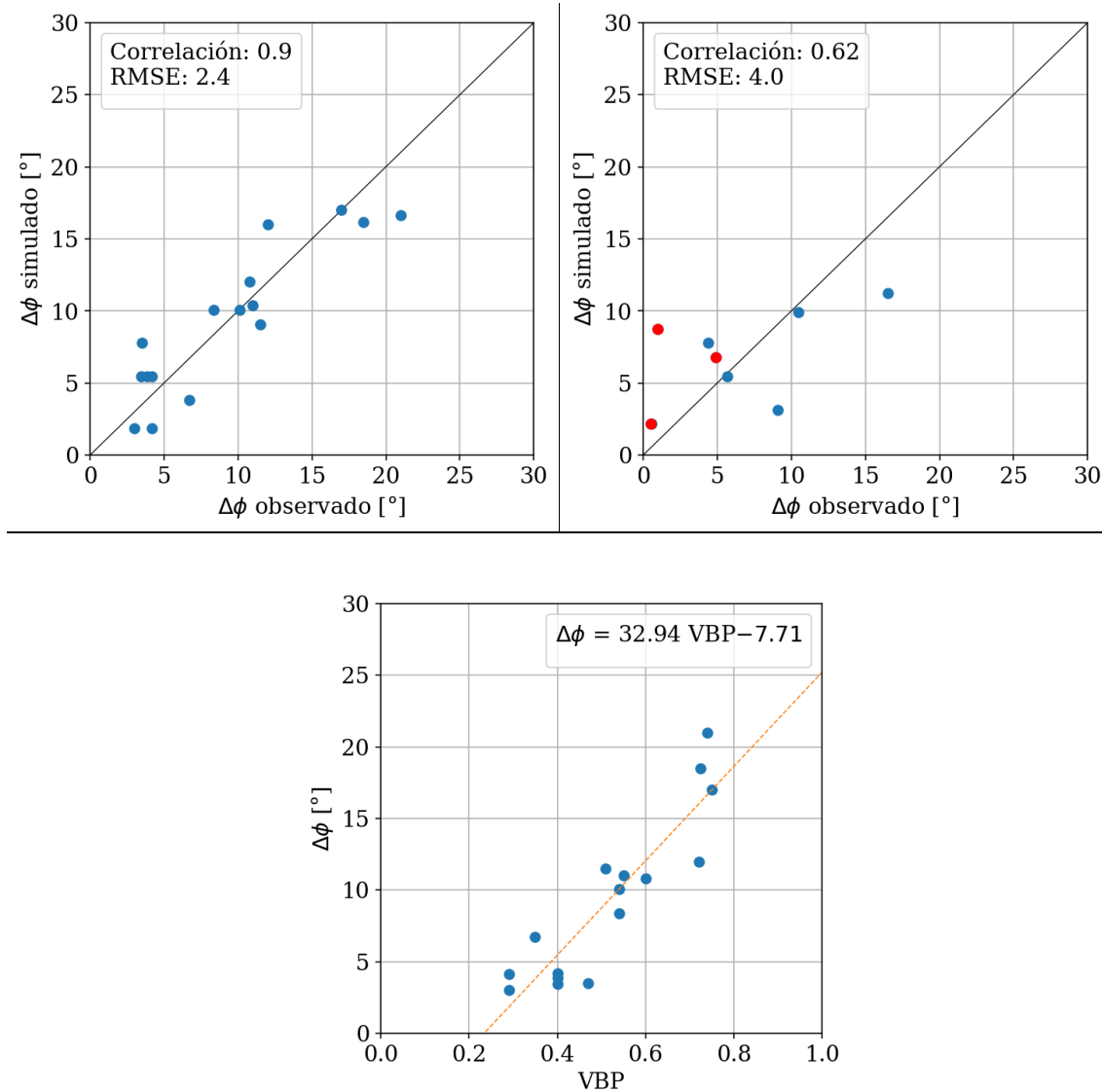
\*Cal: Calibración      \*Val: Validación

Elaboración propia

En la Figura 4-94 se presenta un ejemplo de los resultados obtenidos para la iteración N°33.

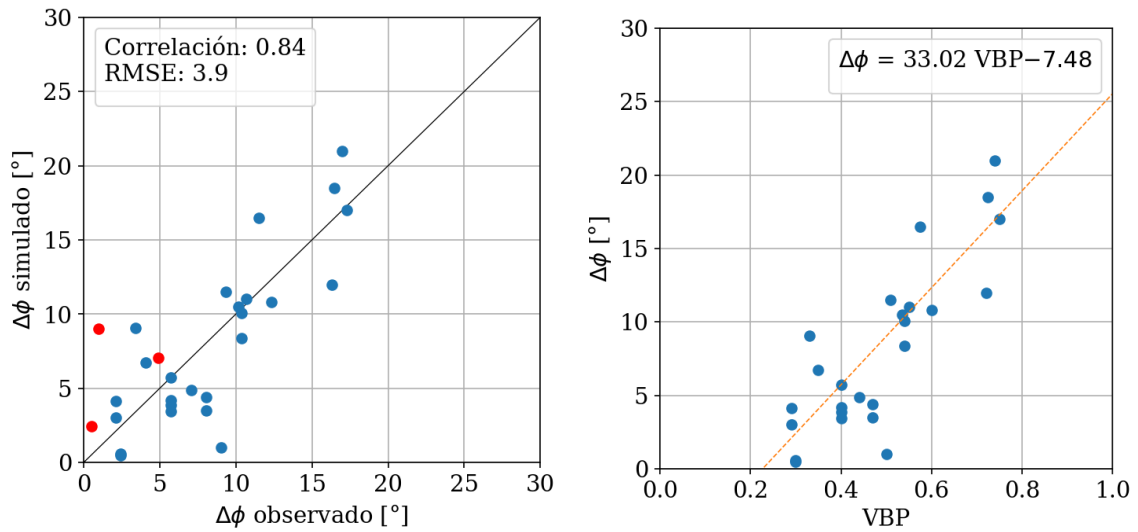
Finalmente, al promediar todos los coeficientes obtenidos en las distintas iteraciones, se obtiene la ecuación lineal de la Regresión N°6, que relaciona el incremento del ángulo de fricción efectivo  $\Delta\varphi'$  del *bims* respecto a la matriz, y la proporción volumétrica de bloques

VBP, este último, obtenido por la metodología propuesta por (Medley E. , The Engineering Characterization of Melanges and Similar Block-in-Matrix Rocks (Bimrocks), 1994). Los resultados se presentan en la Figura 4-95.



**Figura 4-94.** Iteración N°33 de la Regresión N°6.  $\phi_{\text{observado}}$  vs  $\phi_{\text{simulado}}$  con datos de entrenamiento (superior-izquierda) y datos de prueba (superior-derecha), y regresión (inferior).

Elaboración propia.



$$R = 0,84 - R^2 = 0,71 - RMSE = 3,9$$

**Figura 4-95.** Regresión N°6.  $\phi_{\text{observado}}$  vs  $\phi_{\text{simulado}}$  (izquierda) y regresión (derecha) Elaboración propia.

$$\Delta\phi = 33,024VBP - 7,485 \quad (24)$$

Después de realizar la validación cruzada, se compilan las ecuaciones y estadísticos obtenidos. Los resultados muestran que las seis (6) ecuaciones propuestas en el presente trabajo investigativo para obtener el ángulo de fricción  $\phi$ , o el incremento del ángulo de fricción respecto a la matriz  $\Delta\phi$ ; a partir de la proporción de bloques VBP y del coeficiente de uniformidad  $c_u$ , tienen una buena correlación, obteniendo valores del coeficiente de Pearson  $R$  entre 0,65 y 0,84. Adicionalmente, se obtuvo un error cuadrático medio entre  $2,73^\circ$  y  $6,21^\circ$ , lo que también es indicio de un buen ajuste. La base de datos que respalda los hallazgos, es una base robusta ya que cuenta con un total de 40 valores de resistencia para igual número de muestras. Los resultados se presentan en la Tabla 4-30.

**Tabla 4-30.** Regresiones propuestas en esta investigación.

Regresión N°	R	R <sup>2</sup>	RMSE	Ecuación
1	0.68	0.46	5.02	$\varphi=39.056VBP^{0.369}$
2	0.67	0.45	2.73	$\varphi= 21.986 VBP + 18.946$
3	0.65	0.42	6.21	$\varphi=47.724 c_u^{0.123}$
4	0.7	0.49	3.86	$\varphi=22.395 VBP + 20.149$
5	0.66	0.44	5.13	$\varphi=18.269 VBP + 19.776$
6	0.84	0.71	3.9	$\Delta\varphi=33.024 VBP + 7.485$

Elaboración propia

## Capítulo 5

### 5. Conclusiones y recomendaciones

Como parte del trabajo investigativo se creó una base de datos compuesta por resultados de ensayos de compresión triaxial, de gran escala, realizados sobre 40 muestras. Para cada muestra se contó con datos como origen del material y granulometría, con los cuales fue posible determinar parámetros como la proporción volumétrica de bloques  $VBP$ , el coeficiente de uniformidad  $c_u$  y la forma de los bloques. Con esta información se construyeron curvas que relacionaran estos parámetros con los parámetros de resistencia  $c'$  y  $\varphi'$ . Estas curvas fueron matematizadas con el propósito de proponer ecuaciones, identificando la bondad de ajuste de las correlaciones obtenidas. Para validar los resultados de la matematización se procedió a realizar pruebas in-situ  $HCT$  sobre suelos de diferente origen (lleno antrópico y depósito de vertiente).

El trabajo investigativo culminó con un ejercicio estadístico, consistente en la realización de una validación cruzada aleatoria, usando los resultados de los ensayos efectuados en campo y la base de datos conformada con la información recopilada.

Con base en el trabajo realizado se proponen las ecuaciones que se presentan a continuación, las cuales permiten hallar, entre otros, el ángulo de fricción  $\varphi$  y el incremento del ángulo de fricción respecto al de la matriz  $\Delta\varphi$ ; a partir de la proporción de bloques  $VBP$

y/o del coeficiente de uniformidad  $c_u$ . También se hizo el ejercicio de proponer ecuaciones que permitieran obtener la cohesión  $c$ , a partir de los parámetros hallados; sin embargo, los datos no mostraron correlación alguna.

$$\varphi = 39.056VBP^{0.369} \quad (25) - VBP \text{ obtenida por el método de Nanclares, 2008}$$

$$\varphi = 21.986 VBP + 18.946 \quad (26) - VBP \text{ obtenida por el método de Nanclares, 2008}$$

$$\varphi = 47.724 c_u^{0.123} \quad (27)$$

$$\varphi = 22.395 VBP + 20.149 \quad (28) - VBP \text{ obtenida por el método de Nanclares, 2008}$$

$$\varphi = 18.269 VBP + 19.776 \quad (29) - VBP \text{ obtenida por el método de Nanclares, 2008}$$

$$\Delta\varphi = 33.024 VBP + 7.485 \quad (30) - VBP \text{ obtenida por el método de Medley, 1994}$$

Adicionalmente, del presente trabajo, pueden sacar múltiples conclusiones, las cuales se presentan a continuación:

1. Tras comparar el límite que separa la matriz de los bloques haciendo uso de los métodos de Medley (Medley E. , *The Engineering Characterization of Melanges and Similar Block-in-Matrix Rocks (Bimrocks)*, 1994) y Nanclares (Nanclares, 2018), se encontró que el valor propuesto por Nanclares es menor en el 87,5% de los geomateriales estudiados; es decir, en 35 de las 40 muestras analizadas. En promedio, el límite que separa la matriz de los bloques en un *bimsoil* es un 65% menor que el valor estimado de acuerdo a la metodología de Medley.
2. Al comparar el límite matriz/bloque por la metodología de Nanclares, con el diámetro de muestra (es decir, la  $L_c$ ) de cada material estudiado, se evidencia que la mayoría de los valores (el 72.5% de los materiales estudiados) se encuentran por debajo del 1% de  $L_c$ . En promedio, el límite matriz/bloque hallado con la propuesta de Nanclares, corresponde al 1,75% de  $L_c$ . Este resultado respalda los hallazgos de (Coli, Berry, & Boldini, *Analysis of the block-size distribution in the Shale-Limestone Chaotic Complex (Tuscany, Italy)*, 2008); los cuales encontraron el límite matriz/bloque haciendo uso de la metodología de Medley para un Complejo Caótico de Esquisto-Calizas ubicado en la Toscana italiana. Los resultados mostraron que el valor que separa la matriz de los bloques para ese material fue aproximadamente igual al 0,25% de la  $L_c$ . De acuerdo con lo anterior, el valor propuesto por Medley (5,0% de la  $L_c$ ) no es un absoluto y puede variar de material en material.



3. Se concluye que el límite matriz/bloque no solo depende de la  $L_c$ . Este puede también variar de acuerdo a la distribución del material. Es por ello que la metodología propuesta por Nanclares y para la cual se desarrolla la formulación matemática en el presente estudio, puede ser una buena alternativa, ya que considera la granulometría del material de interés. Una limitante encontrada para este método, es que con ella se puede encontrar el límite matriz/bloque para cualquier granulometría, inclusive si esta es la de un suelo fino sin bloques. Dado que el enfoque de los *bims* no es aplicable a materiales en los cuales no hay presencia de bloques embebidos en matriz, se recomienda, como trabajo futuro, considerar el efecto de la escala o definir un límite inferior para el valor que pueda arrojar el método de Nanclares. De acuerdo con lo anterior, se concluye que el método de Nanclares tiene como principal ventaja que tiene en cuenta la granulometría del material, pero a su vez debe complementarse con los postulados de Medley, en donde se tiene en cuenta el efecto de la escala para hallar el límite que separa la matriz de los bloques.
4. Al comparar la proporción volumétrica de bloques  $VBP$ , se encuentra que la  $VBP$  hallada por la metodología de Nanclares es mayor en la mayoría de los casos que la  $VBP$  encontrada a partir del método de Medley. En promedio, el valor hallado con el primer autor es un 213% mayor a la determinada por el segundo autor.
5. Para los 40 materiales estudiados se determinaron los parámetros de resistencia al corte ( $c'$  y  $\varphi'$ ), haciendo uso del criterio de falla de Mohr-Coulomb. Los resultados se evidencian gran variabilidad de la resistencia. Por ejemplo, los valores de cohesión efectiva  $c'$  varían entre 3  $kPa$  y 355  $kPa$ , con un promedio de 116  $kPa$ . Por otro lado, el ángulo de fricción efectivo  $\varphi'$  oscilan entre 19° y 46°, con una media de 33°.
6. Se encontró que existe un efecto importante de la cantidad de bloques, medida a través de la  $VBP$ , en la variación del ángulo de fricción  $\varphi'$ . Las mejores correlaciones se obtuvieron al comparar la  $VBP$  hallada por el método de Nanclares. Con este método, inicialmente se pudo obtener una tendencia lineal y potencial con un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0,42 (Ver Figura 4-39) y 0,48, (Ver Figura 4-40) respectivamente; mientras que con el método de Medley se logró una tendencia lineal, con un  $R^2$  de 0,007 (Ver Figura 4-41).

7. Al llevar a cabo un análisis detallado de los datos de ángulo de fricción ( $\varphi'$ ) y la *VBP* encontrada por el método de Medley, se evidencia que, si se normalizan usando los valores de la matriz como base, se obtienen mejores resultados en comparación de si no se hubieran normalizado. Con esos valores se construyó una gráfica que relacionara el  $\Delta\varphi$  (el cual es la diferencia entre el ángulo de fricción del *bim* y el de la matriz) con la *VBP* mediante una tendencia lineal, para la cual se encontró un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0,37. Los resultados se presentan en la Figura 4-42.
8. Los hallazgos presentados en la Figura 4-42 se compararon con las tendencias propuestas por otros autores. Para ello, se utilizaron los resultados del estudio publicado por (Kalender, Sonmez, Medley, Tunusluoglu, & Kasapoglu, 2014) y se construyó la Figura 4-43. En ella se evidencia que los *bimrocks* presentan una mejoría en el ángulo de fricción muy marcado, incluso para pequeños aumentos en la *VBP*. En los *bimsoils*, al no tener la matriz soldada, este aumento no es tan marcado, por lo que la pendiente de la línea de tendencia es menor.
9. Al conjugar los datos obtenidos por Lindquist y los de este trabajo, se puede hallar una tendencia más robusta. Así, para proporciones de bloques bajas, esta investigación arroja valores más cercanos a las tendencias halladas; mientras que para *VBP* mayores, los datos de Lindquist se acoplan mejor. Los resultados de este híbrido se presentan en la Figura 4-44, para el cual se obtuvo un  $R^2$  igual a 0,75.
10. Al comparar la cohesión  $c'$  con la *VBP* hallada por ambos métodos, no se encontró correlación entre las variables analizadas. Haciendo uso de la metodología de Nanclares, se encontró un  $R^2$  igual a 0,0069 y 0,01169 para las tendencias lineal y logarítmica, respectivamente. Para el método de Medley, los resultados fueron similares, obteniendo un  $R^2$  igual a 0,071 para la tendencia lineal. Debido a la pobre correlación hallada, se procedió a encontrar el aumento de la cohesión respecto a la matriz  $\Delta c'$ , procediendo de manera similar a como se hizo con el ángulo de fricción  $\varphi'$ . Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 4-47. De nuevo la correlación, dada por un  $R^2 = 0,0753$ , arroja un resultado pobre, por lo que no se encontró relación entre las variables analizadas.

11. Una posible razón para que no se encuentre relación alguna entre  $c'$  y  $VBP$ , es el hecho de que la cohesión es un parámetro que se encuentra controlado por la fracción fina, y depende en gran medida de la actividad y fuerzas electromagnéticas de los suelos. De acuerdo con lo anterior, la matriz es la que controla este parámetro, el cual, de acuerdo con los resultados obtenidos, no se ve influenciado por la fracción gruesa o la cantidad de bloques que tenga la geomasa. Sin embargo y a pesar de que no se obtuvieron buenas correlaciones, se observa que en general la tendencia observada en la Figura 4-45 (metodología de Nanclares) y la Figura 4-47 (metodología de Medley, normalizada respecto a la resistencia de la matriz) es decreciente, lo cual indica que en la medida que aumenta la cantidad de bloques, la cohesión tiende a disminuir. Esto se puede explicar debido a que, en la medida que la fracción gruesa incrementa, esta empieza a regir sobre la resistencia; mientras que la fracción fina pierde influencia dentro de la resistencia de todo el conjunto. Lo anterior respalda lo presentado por autores como (Lindquist E. S., 1994), (Kalender, Sonmez, Medley, Tunusluoglu, & Kasapoglu, 2014), entre otros.
12. Para respaldar lo afirmado, se procedió a hacer una gráfica de  $c'$  vs  $VBP$  para cada material estudiado. Lo anterior se hizo buscando eliminar el efecto de las diferencias que se puedan encontrar entre los suelos que conforman la matriz en cada material. Así, se puede tener mayor grado de certeza de que la principal variable será el contenido de bloques, y no las diferencias en el suelo que conforma la porción fina. Los resultados se presentan en la Figura 4-48 y Figura 4-49. La Figura 4-48 (metodología de Nanclares), muestra que, al graficar cada fuente de material por separado, se evidencia una mayor correlación entre las variables. Los valores de  $R^2$  para los materiales con tendencia decreciente, oscilaron entre 0,4971 y 0,9938, con un  $R^2$  promedio de 0,63 y una desviación estándar de 0,21. Adicionalmente, se observa que en siete (7) de los ocho (8) gráficas construidas; es decir, en el 87,5% de los materiales analizados, se tuvo una tendencia decreciente.
13. Por otro lado, los resultados obtenidos por la metodología de Medley (Ver Figura 4-49), fueron más erráticos. La mitad (50%) presentaron una tendencia creciente y la otra mitad (50%) decreciente. Los valores de  $R^2$  oscilaron entre 0,4971 y 0,9938, con un

$R^2$  promedio de 0,44 y una desviación estándar de 0,39. Una posible explicación para estos resultados puede encontrarse al revisar los valores obtenidos en la sección anterior; en donde la metodología de Medley solo arrojó valores adecuados al normalizar el ángulo de fricción  $\phi'$  respecto a la matriz.

14. Para determinar el efecto de la forma de los bloques en la resistencia al corte de los materiales, se agruparon los datos en dos conjuntos; aquellos cuya forma es angular o subangular, y los de forma redondeada o subredondeada. Los datos se graficaron relacionando la proporción de bloques  $VBP$  obtenida por el método de Nanclares, con el ángulo de fricción  $\phi'$ . Para cada grupo, se trazó una línea de tendencia lineal obteniendo un  $R^2$  de 0,44 y 0,37 para los bloques angulares/subangulares y los redondeados/subredondeados, respectivamente. Los resultados se presentan en la Figura 4-50. De ella, se observa que los bloques angulares tienen, en general, un mayor ángulo de fricción para diferentes valores de  $VBP$ , en comparación con los bloques redondeados. En promedio, el  $\phi'$  de los bloques angulares es de  $35,3^\circ$ ; mientras que el de los bloques redondeados es de  $31,3^\circ$ . Se propone para futuras investigaciones complementar la base de datos utilizada y estudiar a través de pruebas estadísticas el efecto de la forma de los bloques, considerando la variabilidad intrínseca del parámetro estudiado.
15. De la Figura se observa también que el efecto de la forma es más importante en la medida que aumenta la proporción de bloques. Esto se ve reflejado por las regresiones lineales, las cuales tienden a alejarse conforme  $VBP$  aumenta; es decir, en la medida que la proporción de bloques es mayor, la diferencia entre el ángulo de fricción  $\phi'$  para bloques redondeados y angulares incrementa. Lo anterior es congruente con lo encontrado por otros autores; en donde (Kalender, Sonmez, Medley, Tunusluoglu, & Kasapoglu, 2014) afirma que por encima del 60% la cantidad de bloques es tal que se presentan contactos entre ellos; por lo que la resistencia del *bim* se ve afectada por la redondez del bloque, el grado de trabazón entre bloques y el esfuerzo normal de confinamiento.
16. Para hallar la influencia de la gradación en la resistencia, se encontró el coeficiente de uniformidad  $c_u$  y de curvatura  $c_c$  para las muestras ensayadas; y se compararon con

los parámetros de resistencia obtenidos. Los resultados muestran que es el ángulo de fricción  $\varphi'$  y el coeficiente de uniformidad  $c_u$  se pueden asociar a través de una tendencia potencial, obteniendo un  $R^2$  igual a 0,46 (Ver Figura 4-51). Al analizar el sentido físico de la tendencia hallada, se encuentra que ésta es congruente con los antecedentes y deducciones obtenidas a partir de otras investigaciones. Lo anterior es debido a que, dado que  $c_u$ , es la relación entre  $D_{60}$  y  $D_{10}$ , mientras mayor es  $c_u$ , mayor es el rango de tamaños que abarca la granulometría de la muestra. En otras palabras, cuando  $c_u$  tiende a 1,  $D_{10}$  y  $D_{60}$  tienden a ser iguales y la granulometría muestra se encuentra concentrada en un mismo rango de tamaños, es decir, está bien seleccionada. En el caso contrario, mientras mayor sea  $c_u$ , mayor es la diferencia entre  $D_{10}$  y  $D_{60}$ , por lo que la muestra está mal seleccionada. Así, un incremento en  $c_u$  es indicio de que el material se encuentra bien gradado, por lo cual la muestra contiene un amplio rango de tamaños que provocan que la superficie de falla tenga un mayor recorrido o sea más tortuosa. Todo ello finalmente se ve traducido en un incremento en el ángulo de fricción  $\varphi'$ , como lo indica la tendencia propuesta en la Figura 4-51.

17. Por otro lado, el coeficiente de curvatura  $c_c$  es el cociente entre el cuadrado de  $D_{30}$  y el producto de  $D_{10}$  y  $D_{60}$ . Este parámetro permite conocer la forma de la curva granulométrica, y da un indicio si esta tiende a ser una recta o posee curvatura. Este valor también se comparó con el ángulo de fricción  $\varphi'$ . Los resultados se presentan en la Figura 4-52 y muestran que no existe correlación entre estas variables, obteniendo un  $R^2$  igual a 0,014.
18. El ejercicio se repitió con la cohesión  $c'$ , comparándola con los coeficientes de uniformidad  $c_u$  y curvatura  $c_c$ . Los resultados tampoco arrojaron correlación entre estas variables, presentando un  $R^2$  de 0,032 (Ver Figura 4-53) y 0,063 (Ver Figura 4-54); por lo que se concluye que no se encontró relación entre estas variables.
19. Para la validación de los resultados se realizaron pruebas en campo *HCT*. En total, se realizaron cinco (5) pruebas en dos (2) sitios: La Distribuidora de Envigado y La Finca Las Mercedes. En el primer sitio, la geología regional mostraba la presencia de un depósito aluvial del río Medellín; sin embargo, al momento de realizar la excavación se encontró un llano antrópico con presencia de bloques subredondeados y

subangulares. En el segundo sitio se encontró un depósito de vertiente con presencia de bloques embebidos en una matriz conformada por arcillas de alta plasticidad. Los parámetros de resistencia de los sitios ensayados se obtuvieron modelando el ensayo en el software de elementos finitos Plaxis 3D Foundation (Plaxis B.V., 2004). Para ello se llevó a cabo un proceso iterativo en el cual las curvas esfuerzo-desplazamiento obtenidas de los datos recogidos en campo, se calibraron con las curvas generadas por el software Plaxis 3D.

20. Los resultados de las pruebas *HCT* realizadas se presentan en la Tabla 4-6 y Tabla 4-7. Los valores de cohesión efectiva  $c'$  varían entre  $2,7 \text{ kPa}$  y  $5,6 \text{ kPa}$ , con un promedio de  $3,94 \text{ kPa}$ . Por otro lado, el ángulo de fricción efectivo  $\phi'$  oscilan entre  $26,5^\circ$  y  $36^\circ$ , con una media de  $32,6^\circ$ .
21. Los resultados obtenidos en la finca Las Mercedes llaman la atención, debido a que, por el carácter cohesivo del suelo que conforma la matriz, se esperaba que este parámetro jugara un papel más importante en la resistencia. Sin embargo, al momento de modelar el ensayo en el software de elementos finitos, cualquier leve incremento en la cohesión, se traducía en un aumento importante en la resistencia, por lo que las curvas generadas por el programa no coincidían con las medidas en campo. Es posible que la falla obtenida en este sitio con ensayo *HCT* coincida más con el mecanismo de punzonamiento, mientras que el software adopte una falla global de la pared de la trinchera. De acuerdo a lo anterior, se concluye que aunque el ensayo *HCT* tiene múltiples ventajas y es recomendado para el estudio de este tipo de materiales, aún se debe estudiar con detalle para perfeccionar los pormenores que pudiese tener.
22. Al realizar una validación inicial con los datos del ensayo *HCT*, de las regresiones para las cuales se observó el mejor comportamiento, se obtuvieron resultados muy positivos (Ver Figura 4-78, Figura 4-79, Figura 4-80 y Figura 4-81). En promedio, para las regresiones en las cuales se obtuvo la *VBP* por el método de Nanclares, se encontró un error porcentual promedio de  $4,0\%$ . Para la regresión que relaciona la fricción  $\phi$ , con el coeficiente de uniformidad  $c_u$ , el error fue del  $2,2\%$ . Finalmente, para la regresión que relaciona el  $\Delta\phi$  con la *VBP*, el error promedio fue del  $416,05\%$ . Estos resultados evidencian el buen comportamiento de las correlaciones propuestas; sin embargo, el

error porcentual estadísticamente no evidencia la variabilidad de las tendencias encontradas. Debido a ello, se realizó una validación cruzada aleatoria.


23. Una de las limitantes que tiene la presente investigación, es que las correlaciones propuestas se realizaron con datos obtenidos de ensayar muestras remoldeadas, es decir, que han perdido totalmente la estructura heredada del material parental. Es por ello que, para validar las tendencias, se propuso la realización de pruebas *HCT* in-situ sobre material inalterado en sitios donde, en lo posible, se encontrarán depósitos recientes en los cuales el efecto de la estructura o el “*aging*” no fuese preponderante. Lo anterior se corroboró en campo al inspeccionar el material ensayado y a partir de pruebas de carga puntual en los bloques, los cuales presentan una resistencia importante (evidencia de que no se encuentran muy alterados). Los resultados obtenidos en este caso permiten concluir y corroborar que, en los depósitos recientes, la densidad y otras propiedades físicas son más importantes para determinar la resistencia, que la estructura del suelo.
24. La validación cruzada aleatoria permite a partir de un proceso iterativo, usar un porcentaje de la base de datos como datos de entrenamiento y otros como datos de prueba. Esto permite obtener una ecuación más robusta desde el punto de vista estadístico, ya que usa todos los datos para validar y calibrar a la vez el modelo propuesto. Tras llevar a cabo este proceso para las mejores tendencias encontradas, se logró refinar las ecuaciones propuestas. Los resultados muestran que las seis (6) ecuaciones propuestas en el presente trabajo investigativo para obtener el ángulo de fricción  $\varphi$ , o el incremento del ángulo de fricción respecto a la matriz  $\Delta\varphi$ ; a partir de la proporción de bloques  $VBP$  y del coeficiente de uniformidad  $c_u$ , tienen una buena correlación, obteniendo valores del coeficiente de Pearson  $R$  entre 0,65 y 0,84. Adicionalmente, se obtuvo un error cuadrático medio entre  $2,73^\circ$  y  $6,21^\circ$ , lo que también es indicio de un buen ajuste. La base de datos que respalda los hallazgos, es una base robusta ya que cuenta con un total de 40 valores de resistencia para igual número de muestras. Se deja para trabajos futuros seguir incrementando los datos, de tal forma de refinar cada vez más las tendencias encontradas.

## **Capítulo 6**

### **6. Anexos**

#### **6.1 Resultados ensayo de laboratorio “Distribuidora de Envigado”**



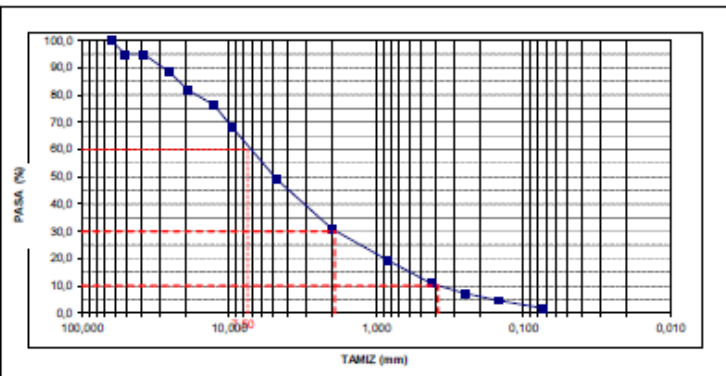
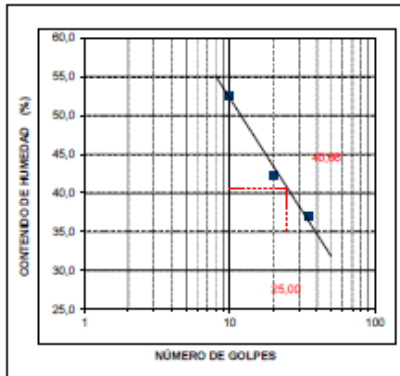
	<b>ENSAYO DE CLASIFICACIÓN LÍMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN NORMAS I.N.V. E-122 - E-123 - E-125 - E-126</b>		Estudios geológicos y geotécnicos Perforaciones, ensayos e instrumentos Estudio de suelos
	PROYECTO: Tesis JMB - Distribuidora de Envigado		HOJA 1 DE 1
LOCALIZACIÓN: Envigado	FECHA RECEPCIÓN: 21/05/2019		
SONDEO: Muestra 1	MUESTRA: 1		
DESCRIPCIÓN: Grava gris bien gradada con arena	PROFUNDIDAD (m): -		

HUMEDAD NATURAL		
ENSAYO	1	2
Vaso #	31	85
P1 gramos	455,70	440,50
P2 gramos	399,80	376,70
P3 gramos	31,00	31,00
% Humedad	15,2	18,5

LÍMITES DE CONSISTENCIA			
LÍMITE LÍQUIDO			
ENSAYO	1	2	3
No Golpes	35	20	10
Vaso #	71	14	56
P1 gramos	16,16	16,03	14,68
P2 gramos	13,59	13,25	11,30
P3 gramos	6,65	6,68	4,87
% Humedad	37,0	42,31	52,6
LÍMITE PLÁSTICO			
ENSAYO	1	2	3
Vaso #	43	11	
P1 gramos	14,46	16,96	
P2 gramos	12,40	14,78	
P3 gramos	4,84	6,39	
% Humedad	27,2	26,0	


GRADACIÓN					
P1 gramos =		5920,0	P2 gramos =		
TAMIZ	PEÑO	RETENIDO	PORCENTAJE		
PULGADA	mm	RETENIDO	RET. ACUM.	PASA	ESPECIFIC.
61/2"	165,10	0,0	0,0	100,0	
6"	152,40	0,0	0,0	100,0	
51/2"	139,70	0,0	0,0	100,0	
5"	127,00	0,0	0,0	100,0	
41/2"	114,30	0,0	0,0	100,0	
4"	101,60	0,0	0,0	100,0	
31/2"	88,90	0,0	0,0	100,0	
3"	76,20	0,0	0,0	100,0	
21/2"	63,50	0,0	0,0	100,0	
2"	50,80	303,6	5,1	94,9	
11/2"	38,10	0,0	0,0	94,9	
1"	25,40	390,3	6,6	88,3	
3/4"	19,05	390,4	6,6	81,7	
1/2"	12,70	319,0	5,4	76,3	
3/8"	9,53	486,9	8,2	68,1	
#4	4,76	1.121,5	18,9	49,1	
10	2,00	1.084,4	18,3	30,8	
20	0,84	672,5	11,4	19,4	
40	0,42	512,2	8,7	10,8	
60	0,25	209,1	3,5	7,3	
100	0,149	152,6	2,6	4,7	
200	0,074	168,9	2,9	1,8	
P/200	P/0,074	108,6	1,8	0,0	

<b>RESULTADOS</b>		<b>CLASIFICACIÓN</b>						
Humedad Natural	15,8	Gravas	50,87	%	Indice de Grupo	0	Cu	19,65
Limite Líquido	41	Arenas	47,29	%	A.A.S.H.T.O.	A-2-7	Cc	1,28
Limite Plástico	27	Finos	1,83	%	U.S.C.S.	GW	D60	7,50
Indice de Plasticidad	14						D30	1,92
							D10	0,38



OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

ELABORÓ:	ALIRIO VERA
REVISÓ:	SANTIAGO U.

	<b>ENSAYO DE CLASIFICACIÓN</b> <b>LÍMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN</b> <b>NORMAS I.N.V. E-122 - E-123 - E-125 - E-126</b>	Estudios geológicos y geotécnicos Perforaciones, ensayos e instrumentos Estudio de suelos
PROYECTO: Tesis JMB - Distribuidora de Envigado LOCALIZACIÓN: Envigado SONDEO: Muestra 2 DESCRIPCIÓN: Grava gris bien gradada con bloques	FECHA RECEPCIÓN: 21/05/2019 MUESTRA: 2 PROFUNDIDAD (m): -	HOJA 1 DE 1

HUMEDAD NATURAL		
ENSAYO	1	2
Vaso #	38	33
P1 gramos	426,50	439,70
P2 gramos	371,00	381,90
P3 gramos	30,50	31,50
% Humedad	16,3	16,5

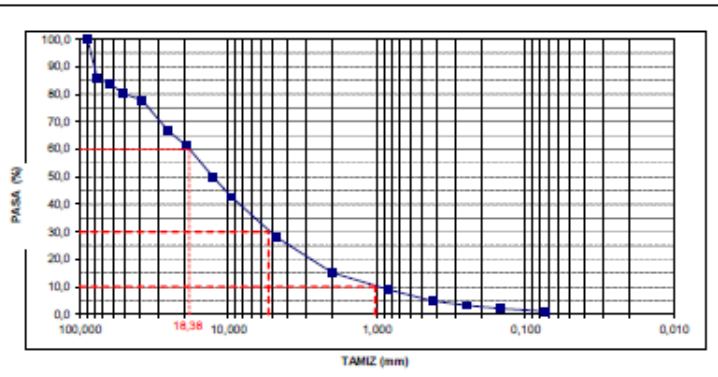
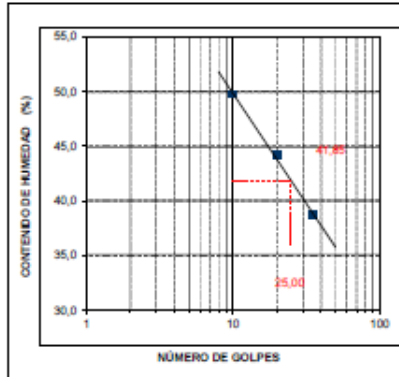
LÍMITES DE CONSISTENCIA			
LÍMITE LÍQUIDO			
ENSAYO	1	2	3
No Golpes	35	20	10
Vaso #	58	31	70
P1 gramos	14,10	16,46	14,47
P2 gramos	11,50	13,46	11,28
P3 gramos	4,76	6,67	4,87
% Humedad	38,7	44,18	49,8

LÍMITE PLÁSTICO			
ENSAYO	1	2	3
Vaso #	3	27	
P1 gramos	15,76	15,74	
P2 gramos	13,35	13,29	
P3 gramos	4,94	4,92	
% Humedad	28,7	29,3	

GRADACIÓN						ESPECIFIC.
P1 gramos =		6424,0	P2 gramos =			
TAMIZ	PEÑO	RETENIDO	RETENIDO	RET. ACUM.	PASA	
61/2"	165,10	0,0	0,0	0,0	100,0	
6"	152,40	0,0	0,0	0,0	100,0	
5 1/2"	139,70	0,0	0,0	0,0	100,0	
5"	127,00	0,0	0,0	0,0	100,0	
4 1/2"	114,30	0,0	0,0	0,0	100,0	
4"	101,60	0,0	0,0	0,0	100,0	
3 1/2"	88,90	0,0	0,0	0,0	100,0	
3"	76,20	913,7	14,2	14,2	85,8	
2 1/2"	63,50	111,8	1,7	16,0	84,0	
2"	50,80	251,7	3,9	19,9	80,1	
1 1/2"	38,10	144,6	2,3	22,1	77,9	
1"	25,40	722,9	11,3	33,4	66,6	
3/4"	19,05	349,3	5,4	38,8	61,2	
1/2"	12,70	721,6	11,2	50,1	49,9	
3/8"	9,53	464,5	7,2	57,3	42,7	
#4	4,76	937,1	14,6	71,9	28,1	
10	2,00	835,7	13,0	84,9	15,1	
20	0,84	393,3	6,1	91,0	9,0	
40	0,42	267,2	4,2	95,2	4,8	
60	0,25	99,1	1,5	96,7	3,3	
100	0,149	74,1	1,2	97,9	2,1	
200	0,074	64,4	1,0	98,9	1,1	
P/200	P/0,074	73,0	1,1	100,0	0,0	


RESULTADOS	
Humedad Natural	16,4
Limite Líquido	42
Limite Plástico	29
Indice de Plasticidad	13

CLASIFICACIÓN	
Gravas	71,87 %
Arenas	26,99 %
Finos	1,14 %
Indice de Grupo	0
A.A.S.H.T.O.	A-2-7
U.S.C.S.	GW
Cu	17,84
Cc	1,52
D60	18,38
D30	5,37
D10	1,03



OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

ELABORÓ:	ALIRIO VERA
REVISÓ:	SANTIAGO U.

	<b>ENSAYO DE CLASIFICACIÓN</b> <b>LÍMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN</b> <b>NORMAS I.N.V. E-122 - E-123 - E-125 - E-126</b>	Estudios geológicos y geotécnicos Perforaciones, ensayos e instrumentos Estudio de suelos
PROYECTO: Tesis JMB - Distribuidora de Envigado	HOJA 1 DE 1	
LOCALIZACIÓN: Envigado	FECHA RECEPCIÓN: 21/05/2019	
SONDEO: Muestra 4	MUESTRA: 4	
DESCRIPCIÓN: Grava gris bien gradada con arena y bloques	PROFUNDIDAD (m): -	

HUMEDAD NATURAL		
ENSAYO	1	2
Vaso #	95	57
P1 gramos	464,30	449,40
P2 gramos	410,80	382,10
P3 gramos	31,20	32,70
% Humedad	14,1	19,3

LÍMITES DE CONSISTENCIA			
LÍMITE LÍQUIDO			
ENSAYO	1	2	3
No Golpes	30	21	10
Vaso #	8	18	64
P1 gramos	16,96	16,54	16,01
P2 gramos	13,83	13,41	12,75
P3 gramos	6,63	6,68	6,65
% Humedad	43,5	46,51	53,4

LÍMITE PLÁSTICO			
ENSAYO	1	2	3
Vaso #	34	60	
P1 gramos	16,73	14,68	
P2 gramos	14,41	12,55	
P3 gramos	6,85	4,98	
% Humedad	30,7	28,1	

GRADACIÓN						
P1 gramos =		6684,0	P2 gramos =			ESPECIFIC.
TAMIZ		PEÑO	PORCENTAJE			
PULGADA	mm	RETENIDO	RETENIDO	RET. ACUM.	PASA	
61/2"	165,10	0,0	0,0	0,0	100,0	
6"	152,40	0,0	0,0	0,0	100,0	
5 1/2"	139,70	0,0	0,0	0,0	100,0	
5"	127,00	0,0	0,0	0,0	100,0	
4 1/2"	114,30	0,0	0,0	0,0	100,0	
4"	101,60	0,0	0,0	0,0	100,0	
3 1/2"	88,90	0,0	0,0	0,0	100,0	
3"	76,20	611,9	9,2	9,2	90,8	
2 1/2"	63,50	0,0	0,0	9,2	90,8	
2"	50,80	173,2	2,6	11,7	88,3	
1 1/2"	38,10	166,5	2,5	14,2	85,8	
1"	25,40	424,2	6,3	20,6	79,4	
3/4"	19,05	288,3	4,3	24,9	75,1	
1/2"	12,70	352,5	5,3	30,2	69,8	
3/8"	9,53	545,8	8,2	38,3	61,7	
#4	4,76	1.338,2	20,0	58,4	41,6	
10	2,00	1.123,1	16,8	75,2	24,8	
20	0,84	673,6	10,1	85,2	14,8	
40	0,42	576,8	8,6	93,9	6,1	
60	0,25	144,0	2,2	96,0	4,0	
100	0,149	111,8	1,7	97,7	2,3	
200	0,074	93,1	1,4	99,1	0,9	
P/200	P/0,074	61,0	0,9	100,0	0,0	

**RESULTADOS**

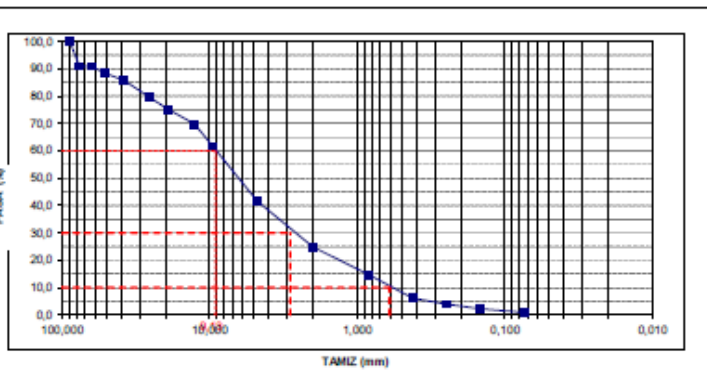
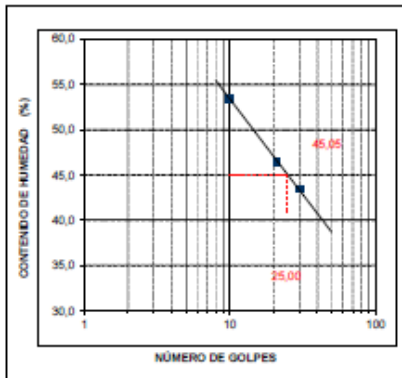
Humedad Natural	16,7
Límite Líquido	45
Límite Plástico	29
Índice de Plasticidad	16

Gravas	58,36	%
Arenas	40,73	%
Finos	0,91	%

**CLASIFICACIÓN**

Índice de Grupo	0
A.A.S.H.T.O.	A-2-7
U.S.C.S.	GW

Cu	15,02
Cc	1,45
D60	9,13
D30	2,85
D10	0,61



OBSERVACIONES: Considerando bloque de concreto

ELABORÓ:	ALIRIO VERA
REVISÓ:	SANTIAGO U.



**MB**  
PERFORACIONES S.A.S.

ENSAYOS DE PESO ESPECIFICO Y HUMEDAD DE ABSORCION  
NORMA NTC - 1974 INVIAS E-128  
NTC - 176 - 237 INVIAS E-222 E-223

CLIENTE:	Juan Manuel Betancourt	FUENTE	PROF. (m)	DESCRIPCION
PROYECTO:	Tesis - Distribuidora Envigado	Muestra 1	-	Grava gris bien gradada con arena
LABORATORISTA :	ALIRIO VERA			
FECHA:	21/05/2019			

MUESTRA Nº		1					
DETERMINACION		A	B	PROMEDIO	A	B	PROMEDIO
ARENA O CASCAJ C	PESO SSS (g)						
	PESO SECO (g)						
EN PICHOMETRO PASA MALLA Nº 4	FRASCO Nº	1					
	TEMPERATURA (°C)	24					
	PESO SSS (g)						
	PESO SECO (g)	84,70					
	PESO FRASCO + AGUA (g)	701,40					
	PESO FRASCO + AGUA + MUESTRA (g)	753,20					
	PESO MUESTRA EN AGUA (g)	51,80					
POR IMERSION RET. MALLA M	PESO CANASTILLA EN AGUA (g)						
	PESO MUESTRA + CANASTILLA EN AGUA (g)						
	PESO MUESTRA EN AGUA (g)						
RESULTADOS	HUMEDAD DE ABSORCION %						
	P.E. BULK						
	P.E. BULK SSS						
	P.E. APARENTE	2,574		2,574			
	VOLUMEN (cm)	32,90					

OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

LABORATORISTA: ALIRIO VERA

REVISÓ: SANTIAGO UNIGARRO



ENSAYOS DE PESO ESPECIFICO Y HUMEDAD DE ABSORCION  
 NORMA NTC - 1974 INVIAS E-128  
 NTC - 176 - 237 INVIAS E-222 E-223

CLIENTE:	Juan Manuel Betancourt	FUENTE	PROF. (m)	DESCRIPCION
PROYECTO:	Tesis - Distribuidora Envigado	Muestra 4	-	Grava gris con arena y bloques
LABORATORISTA :	ALIRIO VERA			
FECHA:	21/05/2019			


MUESTRA Nº		4					
DETERMINACION		A	B	PROMEDIO	A	B	PROMEDIO
ARENA O CASCAJ	PESO SSS (g)						
	PESO SECO (g)						
FRASCO PASADO PASA MALLA Nº 4 EN PIGNOMETRO	FRASCO Nº	1					
	TEMPERATURA (°C)	24					
	PESO SSS (g)						
	PESO SECO (g)	89,20					
	PESO FRASCO + AGUA (g)	701,40					
	PESO FRASCO + AGUA + MUESTRA (g)	756,10					
	PESO MUESTRA EN AGUA (g)	54,70					
POR IMERSION RET. MALLA Nº 4	PESO CANASTILLA EN AGUA (g)						
	PESO MUESTRA + CANASTILLA EN AGUA (g)						
	PESO MUESTRA EN AGUA (g)						
RESULTADOS	HUMEDAD DE ABSORCION %						
	P.E. BULK						
	P.E. BULK SSS						
	P.E. APARENTE	2,586		2,586			
	VOLUMEN (cm)	34,50					

OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

LABORATORISTA: ALIRIO VERA

REVISÓ: SANTIAGO UNIGARRO

## 6.2 Resultados ensayo de laboratorio “Finca Las Mercedes”

	<b>ENSAYO DE CLASIFICACIÓN</b> <b>LÍMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN</b> <b>NORMAS I.N.V. E-122 - E-123 - E-125 - E-126</b>		Estudios geológicos y geotécnicos Perforaciones, ensayos e instrumentos Estudio de suelos
	PROYECTO: Tesis Juan Manuel Betancourt LOCALIZACIÓN: Medellín SONDEO: Muestra 1 DESCRIPCIÓN: Arcilla gravosa gris de alta plasticidad con bloques	FECHA RECEPCIÓN: 19/07/2019 MUESTRA: 1 PROFUNDIDAD (m): 60 cm	HOJA 1 DE 1

HUMEDAD NATURAL		
ENSAYO	1	2
Vaso #	15	6
P1 gramos	131,40	167,30
P2 gramos	106,50	130,80
P3 gramos	32,20	32,00
% Humedad	33,5	36,9

LÍMITES DE CONSISTENCIA			
LÍMITE LÍQUIDO			
ENSAYO	1	2	3
No Golpes	35	23	15
Vaso #	36	1	78
P1 gramos	16,38	14,82	16,31
P2 gramos	12,30	10,41	11,05
P3 gramos	6,57	4,88	4,81
% Humedad	71,2	79,75	84,3

LÍMITE PLÁSTICO			
ENSAYO	1	2	3
Vaso #	6	61	
P1 gramos	16,57	16,17	
P2 gramos	14,35	13,98	
P3 gramos	6,63	6,64	
% Humedad	28,8	29,8	

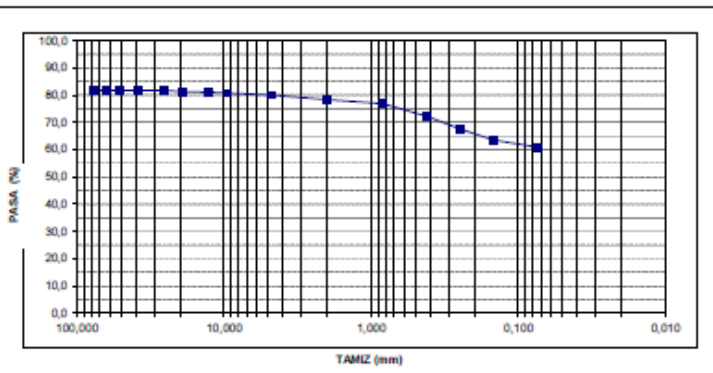
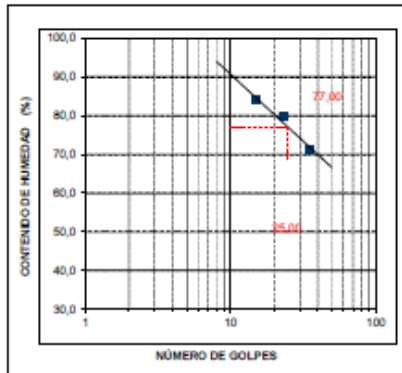
GRADACIÓN						ESPECIFIC.
P1 gramos =		2110,4	P2 gramos =			
TAMIZ	PESO	PORCENTAJE				
PULGADA	mm	RETENIDO	RETENIDO	RET. ACUM.	PASA	
61/2"	165,10	0,0	0,0	0,0	100,0	
6"	152,40	0,0	0,0	0,0	100,0	
5 1/2"	139,70	0,0	0,0	0,0	100,0	
5"	127,00	0,0	0,0	0,0	100,0	
4 1/2"	114,30	0,0	0,0	0,0	100,0	
4"	101,60	0,0	0,0	0,0	100,0	
3 1/2"	88,90	0,0	0,0	0,0	100,0	
3"	76,20	386,0	18,3	18,3	81,7	
2 1/2"	63,50	0,0	0,0	18,3	81,7	
2"	50,80	0,0	0,0	18,3	81,7	
1 1/2"	38,10	0,0	0,0	18,3	81,7	
1"	25,40	0,0	0,0	18,3	81,7	
3/4"	19,05	10,4	0,5	18,8	81,2	
1/2"	12,70	2,4	0,1	18,9	81,1	
3/8"	9,53	8,2	0,4	19,3	80,7	
#4	4,76	14,3	0,7	20,0	80,0	
10	2,00	36,4	1,7	21,7	78,3	
20	0,84	30,4	1,4	23,1	76,9	
40	0,42	97,4	4,6	27,7	72,3	
60	0,25	97,8	4,6	32,4	67,6	
100	0,149	85,4	4,0	36,4	63,6	
200	0,074	56,9	2,7	39,1	60,9	
P/200	P/0,074	1284,8	60,9	100,0	0,0	

**RESULTADOS**

Humedad Natural	35,2	Gravas	19,96	%
Límite Líquido	77	Arenas	19,16	%
Límite Plástico	29	Finos	60,88	%
Índice de Plasticidad	48			

**CLASIFICACIÓN**


Índice de Grupo	20	Cu	0,00
A.A.S.H.T.O.	A-7-6	Cc	0,00
U.S.C.S.	CH	D60	0,00
		D30	0,00
		D10	0,00



OBSERVACIONES:

\_\_\_\_\_

ELABORÓ:	ALIRIO VERA
REVISÓ:	SANTIAGO U.

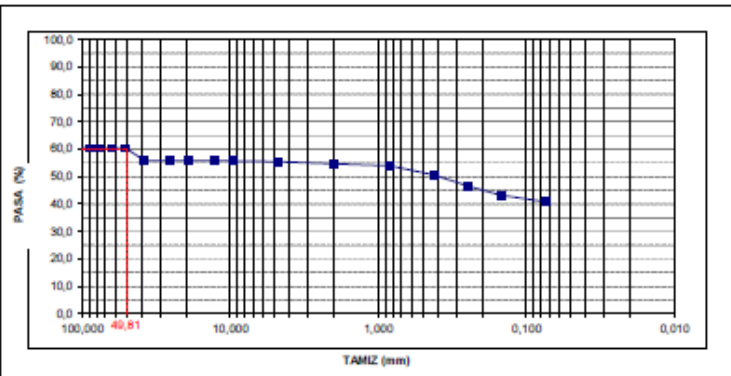
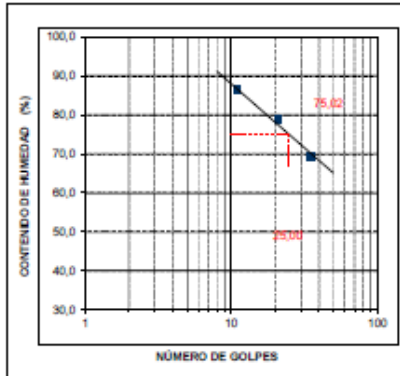
	<b>ENSAYO DE CLASIFICACIÓN</b> <b>LÍMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN</b> <b>NORMAS I.N.V. E-122 - E-123 - E-125 - E-126</b>		Estudios geológicos y geotécnicos Perforaciones, ensayos e instrumentos Estudio de suelos
	PROYECTO: Tesis Juan Manuel Betancourt		HOJA 1 DE 1
LOCALIZACIÓN: Medellín	FECHA RECEPCIÓN: 19/07/2019		
SONDEO: Muestra 2	MUESTRA: 2		
DESCRIPCIÓN: Grava arcillosa con bloques	PROFUNDIDAD (m): -		

HUMEDAD NATURAL		
ENSAYO	1	2
Vaso #	4	11
P1 gramos	156,60	135,00
P2 gramos	125,20	109,80
P3 gramos	33,50	32,10
% Humedad	34,2	32,4

LÍMITES DE CONSISTENCIA			
LÍMITE LÍQUIDO			
ENSAYO	1	2	3
No Golpes	35	21	11
Vaso #	3	63	46
P1 gramos	16,31	16,11	14,76
P2 gramos	12,34	11,92	10,17
P3 gramos	6,63	6,60	4,86
% Humedad	69,5	78,76	86,4
LÍMITE PLÁSTICO			
ENSAYO	1	2	3
Vaso #	23	21	
P1 gramos	15,01	15,09	
P2 gramos	12,70	12,84	
P3 gramos	4,86	4,89	
% Humedad	29,5	28,3	

GRADACIÓN						ESPECIFIC.
P1 gramos =		PESO	P2 gramos =			
TAMIZ	RETENIDO		RETENIDO	RET. ACUM.	PASA	
61/2"	165,10	0,0	0,0	0,0	100,0	
6"	152,40	0,0	0,0	0,0	100,0	
5 1/2"	139,70	0,0	0,0	0,0	100,0	
5"	127,00	0,0	0,0	0,0	100,0	
4 1/2"	114,30	1,476,6	39,6	39,6	60,4	
4"	101,60	0,0	0,0	39,6	60,4	
3 1/2"	88,90	0,0	0,0	39,6	60,4	
3"	76,20	0,0	0,0	39,6	60,4	
2 1/2"	63,50	0,0	0,0	39,6	60,4	
2"	50,80	0,0	0,0	39,6	60,4	
1 1/2"	38,10	168,4	4,5	44,2	55,8	
1"	25,40	0,0	0,0	44,2	55,8	
3/4"	19,05	0,0	0,0	44,2	55,8	
1/2"	12,70	4,6	0,1	44,3	55,7	
3/8"	9,53	1,7	0,0	44,3	55,7	
#4	4,76	8,1	0,2	44,6	55,4	
10	2,00	28,0	0,8	45,3	54,7	
20	0,84	28,7	0,8	46,1	53,9	
40	0,42	125,0	3,4	49,4	50,6	
60	0,25	147,7	4,0	53,4	46,6	
100	0,149	127,7	3,4	56,8	43,2	
200	0,074	88,8	2,4	59,2	40,8	
P/200	P/0,074	1518,9	40,8	100,0	0,0	

RESULTADOS		CLASIFICACIÓN						
Humedad Natural	33,3	Gravas	44,56	%	Índice de Grupo	11	Cu	0,00
Límite Líquido	75	Arenas	14,66	%	A.A.S.H.T.O.	A-7-6	Cc	0,00
Límite Plástico	29	Finos	40,78	%	U.S.C.S.	GC	D60	49,81
Índice de Plasticidad	46						D30	0,00
							D10	0,00



OBSERVACIONES: Incluyendo bloque grande

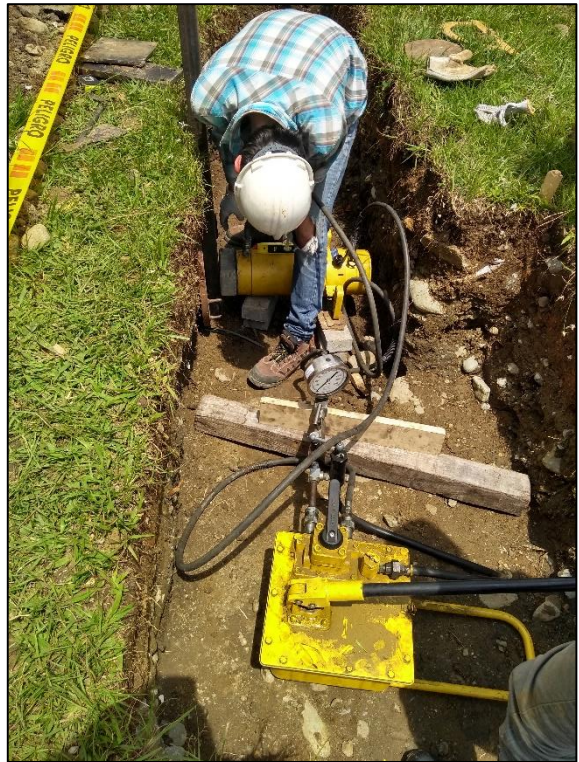
ELABORÓ: ALIRIO VERA  
 REVISÓ: SANTIAGO U.



### 6.3 Registro fotográfico ensayos in-situ HCT















## Capítulo 7

### 7. Bibliografía

- AMVA. (2007). Micro-zonificación sísmica en el Valle de Aburrá y definición del riesgo a deslizamientos e inundaciones. Medellín.
- ASTM Designation: D4318-17. (Reapproved 2017). Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.
- ASTM Designation: D5731-16. (Reapproved 2016). Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications.
- ASTM Designation: D7181-11. (2011). Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils. doi:10.1520/D7181-11
- ASTM Designation: D2216-16. (Reapproved 2019). Standard Test for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass.
- ASTM Designation: D2850-15. (Reapproved 2007). Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils. doi:10.1520/2850-15
- ASTM Designation: D3080-04. (Reapproved 2004). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions.
- ASTM Designation: D4767-11. (Reapproved 2004). Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils. doi:10.1250/D4767-11

- ASTM Designation: D6913/D6913M-17. (Reapproved 2017). Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis.
- ASTM Designation: D854-14. (Reapproved 2014). Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer.
- AtashBahar, M., Jamshidi chenari, R., & Lashteneshaie, M. (2015). Evaluation of the Behavior of Rockfill Material Using Large-Scale Triaxial Tests. *2nd International Conference on Geotechnical % urban Earthquake Engineering*. Tabriz, Irán.
- Ayala, L. (2019). *Explorock SAC Soluciones Geológicas*. Obtenido de Explorock SAC Soluciones Geológicas: <https://www.explorock.com/clasificacion-de-los-depositos-sedimentarios/>
- Barton, N., & Choubey, V. (1997). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics, Vol 10*, 1-54.
- Bates, R., & Jackson, J. (1980). *Glossary of geology*. American Geological Institute.
- Boughton, N. (1970). Elastic analysis for behavior of rockfill. *ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Vol.96*, pp 1715-1733.
- Bowles, J. (1997). *Foundation analysis and design*. McGraw-Hill.
- Braja M. Das. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. California State University, Sacramento: Thomson Learning Inc.
- Brinch Hansen, J. (s.f.). A general formula for bearing capacity. *Geoteknisk Institut. Institute Akademict for de Tekniske Videuskaber, Bulletin N°11*.
- Coli, N., Berry, P., & Boldini, D. (2008). Analysis of the block-size distribution in the Shale-Limestone Chaotic Complex (Tuscany, Italy). *42nd US Rock Mechanics Symposium and 2nd U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium*. San Francisco: ARMA.
- Coli, N., Berry, P., & Boldini, D. (2010). In situ non-conventional test for the mechanical characterisation of a bimrock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*.
- Coli, N., Berry, P., Boldini, D., & Bruno, R. (2009). In situ large size non conventional shear test for the mechanical characterization of a bimrock in The Santa Bárbara open pit mine (Italy). *43rd US Rock Mechanics Symposium and 4th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium*. Asheville, NC.

- Coulomb, C. (1776). Essai sur une application des regles de Maximums et Minimis á quelques Problemes de Statique, relatifs á l'Architecture. á l'Academie royale des Sciences, Vol.3,38. París.
- Deere, D., & Patton, F. (1971). Slope stability in residual soils. *Fourth Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1*, págs. 87-170. Puerto Rico.
- Delesse, A. (1848). Pour determiner la composition des roches. *Ann Des Mines, v.13*, p.379.
- Edmund, M., & Dimitrios, Z. (2011). geopractitioner approaches to working with antisocial mélanges. *The Geological Society of America - Special Paper 480*, 18.
- Esri Inc. (2015). ArcGis 10.4.1 for Desktop.
- Fundación Wikimedia, Inc. (2019). *Wikipedia*. Obtenido de Wikipedia: [https://es.wikipedia.org/wiki/Raíz\\_del\\_error\\_cuadrático\\_medio](https://es.wikipedia.org/wiki/Raíz_del_error_cuadrático_medio)
- Fundación Wikimedia, Inc. (2019). *Wikipedia*. Obtenido de Wikipedia: [https://es.wikipedia.org/wiki/Validaci%C3%B3n\\_cruzada](https://es.wikipedia.org/wiki/Validaci%C3%B3n_cruzada)
- Fundación Wikimedia, Inc. (2019). *Wikipedia*. Obtenido de Wikipedia: [https://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente\\_de\\_correlaci%C3%B3n\\_de\\_Pearson](https://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_correlaci%C3%B3n_de_Pearson)
- Gómez P., E. (2017). Ensayos geotécnicos in-situ. *Curso sibre investigación del subsuelo e instrumentación*. Medellín. Recuperado el 2019
- González-Nicieza, C., Prendes-Gero, M., Fernandez-Rodriguez, R., & Lopez-Gayarre, F. (2013). A new test for the characterization of highly jointed rock masses. *Rock Mechanics for Resources, Energy and Environment*.
- Goodman, R. (1989). *Introduction to rock mechanics*. New York: Wiley.
- Goodman, R., & Ahlgren, C. (May de 2000). Evaluating Safety of Concrete Gravity Dam on Weak Rock: Scott Dam. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 126*, 429-442.
- Goodman, R., & Ahlgren, C. (2001). Evaluating safety of concrete gravity dam on weak rock: Scott Dam. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, V.126*, 429-442.
- Google. (2019). *Google Maps*. Obtenido de Google Maps: <https://www.google.com/maps/@6.2358477,-75.5707908,20542m/data=!3m1!1e3>



- Hamidi, A., Alizadeh, M., & Soleimani, S. (2009). Effect of Particle Crushing on Shear Strength and Dilation Characteristics of Sand-Gravel Mixtures. *International Journal of Civil Engineering, Vol. 7, N°1*.
- Holmes, A. (1921). Petrographic Methods and Calculations. p.525.
- Holtz, R., & Kovacs, W. (1981). *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice Hall.
- Holtz, W., & Ellis, W. (1961). Triaxial shear characteristics of clayey gravel soils. *5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Paris, France.
- Hoyos Patiño, F. (2012). *Geotecnia - Diccionario básico*. Medellín.
- hyg consultores sas. (2015). *MapGis5*. Obtenido de MapGis5: [https://www.medellin.gov.co/MAPGISV5\\_WEB/mapa.jsp?aplicacion=0](https://www.medellin.gov.co/MAPGISV5_WEB/mapa.jsp?aplicacion=0)
- Indraratna, B., Wijewardena, L., & Balasubramaniam, A. (1993). Large-scale triaxial testing of greywacke rockfill. *Géotechnique, 43*, 37-51.
- INGEOMINAS. (1983). Geología de la Plancha 146 - Medellín Occidental. Colombia. Obtenido de <http://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010010001950/mapa/pdf/0101019501300006.pdf>
- INGEOMINAS. (2005). Geología de la Plancha 147 - Medellín Oriental. Colombia. Obtenido de <http://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008010002745/mapa/pdf/2105027451300001.pdf>
- Irfan, T., & Tang, K. (1993). Effect of the coarse fractions on the shear strength of colluvium. *Geo Report #23*.
- Kalender, A., Sonmez, H., Medley, E., Tunusluoglu, C., & Kasapoglu, K. (2014). An approach to predicting the overall strengths of unwelded bimrocks and bimsoils. *Engineering Geology, 183*, 65-79.
- Lindquist, E. (1991). *Fractals-Franciscan and Fractures*. University of California a Berkeley, Department of Civil Engineering, California.
- Lindquist, E. S. (1994). *The Strength and Deformation Properties of Melange*. Ph.D. thesis, Universidad de California, Department of Civil Engineering, Berkeley.
- Lindquist, E., & Goodman, R. (1994). Strength and deformation properties of a physical model melange. *Rock Mechanics*.

- Lopez-Gayarre, F., Fernandez-Rodriguez, R., Gonzalez-Nicieza, C., & García-Menendez, J. (2015). Analysis of viscoelastic behavior of rock salt using hydraulic cylinder test. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 545-553.
- Malamud, B. (2004). Tails of natural hazards. *Physics World*, Volume 17.
- Marsal, R. J. (1967). *Comportamiento de suelos granulares*. Caracas, Venezuela.
- mbf Bioscience. (20 de Abril de 2019). *stereology.info*. Obtenido de *stereology.info*: <http://www.stereology.info/stereology/>
- Medley, E. (1994). *The Engineering Characterization of Melanges and Similar Block-in-Matrix Rocks (Bimrocks)*. PhD Thesis, University of California at Berkeley.
- Medley, E. (1997). Uncertainty in estimates of block volumetric proportions in melange bimrocks. *Engineering Geology and the Environment*.
- Medley, E. (2002). Estimating block size distribution of Melange and similar Block-in-Matrix Rocks (Bimrocks). *Proceedings of 5th North American Rock Mechanics Symposium (NARMS)*, (págs. 509-606). Toronto.
- Medley, E. (2004). Observations on Tortuous Failure Surfaces in Bimrocks. *FELSBAU JOURNAL FOR ENGINEERING GEOLOGY, GEOMECHANICS AND TUNNELLING*.
- Medley, E. (2008). Engineering the Geological Chaos of Franciscan and Other Bimrocks. *Melanges, Mixed Materials and Chaotic Rocks*. San Francisco, California.
- Medley, E., & Lindquist, E. (1995). The engineering significance of the scale-independence of some Franciscan melanges in California, USA. *Rock Mechanics*.
- Medley, E., & Rehermann, P. (2004). Characterization of Bimrocks (Rock/Soil Mixtures) With Application to Slope Stability Problems. *Proceedings: Eurock 2004 & 53rd Geomechanics Colloquium*. Salzburg, Austria.
- Medley, E., & Zekkos, D. (2011). Geopractitioner approaches to working with antisocial mélanges. *The Geological Society of America* (Special Paper 480).
- Meissner, H. (1991). Empfehlungen des Arbeitskreises "numerik in der geotechnik" der. *G. Geotechnik*, 14, 1-10.
- Meyerhof, G. (1961). The ultimate bearing capacity of wedge-shaped foundations. *V Congreso Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones Vol II*. París.
- Meyerhof, G. (1963). Some recent research on the bearing capacity of foundations. *Canadian Geotechnical Journal Vol I*.



- Mohr, O. (1900). Welche Umstände Bedingen die Elastizitätsgrenze und den Bruch eines Materiales? *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, Vol44, 1524-1530, 1572-1577.
- Nanclares, F. (2018). *Comportamiento Mecánico de Suelos Grueso Granulares de Origen Aluvial*. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Bogotá.
- Plaxis B.V. (2004). Plaxis 3D Foundation v1.1.
- python TM. (2019). *python*. Obtenido de python: <https://www.python.org>
- Roadifer, J., Forrest, M., & Lindquist, E. (2009). Evaluation of shear strength of Mélange foundation at Calaveras Dam. *Proceedings of 29th US Society for Dams, Annual Meeting and Conference: "Managing our Water Retention Systems"*. Nashville - Tennessee.
- Rodríguez, R. F., Nicieza, C. G., Gayarre, F. L., & Ramos Lopez, F. (2015). Application of hydraulic cylinder testing on determine the geotechnical properties of earth-filled dams. *Geomechanics and Engineering Vol 9*, 483-498.
- Rollins, K., Evans, D., Diehi, N., & Daily III, W. (1998). Shear modulus and damping relationship for gravels. *ASCE Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, pp. 396-405.
- Rosiwal, A. (1898). Über geometrische Gesteinsanalysen . *Verhandl der K-K geologische Reichanstalt*, v.5/6, p.143.
- Sarac, M., & Popovic, M. (1985). Shear strength of rockfill and slope stability . *Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, (págs. pp. 641-645). San Francisco.
- Sharma, V., Venkatachalam, K., & Roy, A. (1994). Strength and deformation characteristics of rockfill materials. *XIII ICSMFE*. New Delhi, India.
- Sonmez, H., Altinsoy, H., Gokceoglu, C., & Medley, E. (2006). Considerations in developing an empirical strength criterion for bimrocks. *4th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS)*. Singapore.
- Sonmez, H., Gokceoglu, C., Medley, E., Tuncay, E., & Nefeslioglu, H. (2006). Estimating the uniaxial compressive strength of a volcanic bimrock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 554-561.
- Terzaghi, K. (1956). *Theoretical Soil Mechanics - Cap VIII*. John Wiley and Sons.

- Thomson, E. (1930). Quantitative Microscopic Analysis. *Journal of Geology*, v.XXXVIII, p.193-222.
- Tien, Y., Chung, Y., Lu, Y., & Chang, C. (2012). The uncertainty of volumetric fraction and mechanical behaviors of Bimrocks. *1st year report National Science Council*. Taiwan.
- Tien, Y., Lin, J., Kou, M., Lu, Y., Chung, Y., Wu, T., & Lee, D. (2010). Uncertainty in Estimation of Volumetric Block Proportion of Bimrocks by Using Scanline Method. *44th US Rock Mechanics Symposium and 5th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium*. Salt Lake City, UT.
- Tien, Y., Lu, Y., Chang, H., Chung, Y., Lin, J., & Lee, D. (2012). Uncertainty of Volumetric Fraction Estimates Using 2-D Measurements. *46th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. Chicago.
- Tien, Y., Lu, Y., Wu, T., & Chung, Y. (2010). Analytical solution for uncertainty of volumetric proportion using linear measurement. *Taiwan Rock Engineering Symposium*. Taiwan.
- Tien, Y., Lu, Y., Wu, T., & Chung, Y. (2011). Quantify uncertainty in scanline estimates of volumetric fraction of anisotropic scanline estimates of volumetric fraction of anisotropic bimrocks. *45th US Rock Mechanics Symposium*. San Francisco.
- Tosun, H., Mirata, T., Mollamahmutoglu, M., & Colakoglu, N. (1999). Shear strength for gravel and rockfill measured in triaxial and prismatic wedge shear tests. *Electronic journal of geotechnical engineering*.
- Turcotte, D., Malamud, B., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2002). Self-organization, the cascade model, and natural hazards. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 99.
- Underwood, E. (1970). Quantitative Stereology. *Reading, MA*, p.273.
- US Bureau of Reclamation. (1966). *Summary of large triaxial shear tests for silty gravels earth research studies - Report N°EM-731*. Denver, Colorado.
- Vallejo, L., & Mawby, R. (2000). Porosity influence on the shear strength of granular-clay mixtures. *Engineering Geology*, 125-136.
- Weibel, E. (1979). Stereological Methods, vol 1. En E. Weibel, *Practical Methods for Biological Morphometry* (Vol. v.1). New York: Academic Press.

Xu, W.-J., Xu, Q., & Hu, R.-L. (2011). Study on the shear strength of soil-rock mixture by large scale direct shear test. *International Journal of rock Mechanics & Mining Sciences*, 1235-1247.

Zhang, Z.-L., Xu, W.-J., Xia, W., & Zhang, H.-Y. (2015). Large-scale in-situ test for mechanical characterization of soil-rock mixture used in an embankment dam. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 317-322.