

Análisis exploratorio del comportamiento geomecánico de materiales granulares marginales  
compactados por el método giratorio

Sebastián Vallejo Quintero

Trabajo de grado para optar al título de Magister en Geotecnia

Director

Alex Eduardo Alvarez Lugo, Ph.D.

Codirector

Vladimir Ernesto Merchán Jaimes, Ph.D.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2022

**Dedicatoria**

A Dios por sus bendiciones, por ser mi camino y mi guía, por darme fortaleza y conocimiento para alcanzar este logro en mi vida.

A mi madre María Teresa Quintero, por su apoyo incondicional, motivación, valores inculcados y mi ejemplo a seguir.

A mis hermanos Jorge Vallejo y Saúl Vallejo, por siempre animar a superarme cada día y creer en mí.

A mi pareja Alejandra Pérez, por admirar mi dedicación en la academia, motivarme a ser exitoso y apoyarme en la flexibilidad horaria.

*Sebastián Vallejo Quintero*

### **Agradecimientos**

Agradezco a Dios por hacer posible esta meta la cual me marca profesionalmente, a mi familia por el acompañamiento, sacrificio y ánimo brindado, porque sin ellos esto no sería posible.

Agradezco al director Alex Alvarez Lugo y co-director de proyecto Vladimir Merchán Jaimes, por su tiempo, esfuerzo y dedicación a lo largo del desarrollo del proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander, personal del laboratorio, por su apoyo durante la fase experimental del proyecto y por compartir sus conocimientos a lo largo de la preparación de muestras.

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
1 Objetivos .....	14
1.1 Objetivo General.....	14
1.2 Objetivos Específicos .....	14
2 Marco Teórico.....	15
2.1 Material tipo subbase.....	15
2.1.1 Instituto nacional de vías – INVIAS .....	15
2.1.2 Ministerio de Fomento (España).....	16
2.1.3 Oficina Nacional de Normalización (NC) (Cuba) .....	19
2.1.4 Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC)(Perú) .....	20
2.1.5 Ministerio de Obras Públicas (MOP) (Chile).....	20
2.1.6 Federal Highway Administration (FHWA) y American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (Estados Unidos) .....	21
2.1.7 Transit New Zealand (TNZ) (Nueva Zelanda).....	22
2.2 Compactación por método giratorio .....	22
2.3 Succión del suelo .....	23
2.4 Curva de retención de agua del suelo .....	24
2.5 Técnica del papel filtro para medición de succión .....	24
2.6 Módulo resiliente.....	25
2.6.1 Ensayo triaxial dinámico.....	26
3 Generalidades.....	29
3.1 Localización material de cantera y triturado .....	29
3.2 Geología regional .....	30
3.2.1 Formación silgará (pDs).....	31
3.2.2 Granito de Pescadero (JTRgp) .....	32
3.3 Geología estructural.....	32
3.4 Calidad del material granular marginal .....	34
4 Materiales.....	35
4.1 Material de cantera y material de triturado.....	35
4.2 Bentonita y Caolinita.....	35
5 Metodología .....	37
5.1 Nomenclatura de ensayos triaxiales .....	37

5.2 Tamizado de material de cantera y triturado .....	37
5.3 Control de granulometría.....	37
5.4 Análisis de plasticidad (límites de Atterberg) .....	38
5.5 Mezclado y empaquetado .....	40
5.6 Compactación de probetas.....	41
5.7 Medición de módulo resiliente (MR) – ‘Condición inicial’ .....	42
5.8 Trayectoria de secado en condición transitoria .....	42
5.9 Medición de succión total en trayectoria de secado en condición transitoria .....	44
5.10 Medición de módulo resiliente (MR) - Secado .....	45
5.11 Trayectoria de humedecimiento en condición transitoria.....	45
5.12 Medición de succión total en trayectoria de humedecimiento .....	46
5.13 Medición de módulo resiliente (MR) - Humedecimiento .....	46
6 Resultados y Análisis.....	48
6.1 Rigidez.....	50
6.1 Estimación de la Succión Total .....	62
6.1.1 Succión post-secado.....	62
6.1.2 Succión post-humedecimiento .....	64
6.2 Deformación plástica.....	66
7 Conclusiones .....	70
8 Recomendaciones .....	72
9 Referencias Bibliográficas .....	73

**Lista de Figuras**

	Pág.
Figura 1 .....	13
Figura 2 .....	17
Figura 3 .....	23
Figura 4 .....	24
Figura 5 .....	25
Figura 6 .....	28
Figura 7 .....	30
Figura 8 .....	31
Figura 9 .....	33
Figura 10 .....	39
Figura 11 .....	40
Figura 12 .....	40
Figura 13 .....	41
Figura 14 .....	42
Figura 15 .....	43
Figura 16 .....	45
Figura 17 .....	46
Figura 18 .....	52
Figura 19 .....	53
Figura 20 .....	55
Figura 21 .....	56
Figura 22 .....	57
Figura 23 .....	60
Figura 24 .....	62
Figura 25 .....	63
Figura 26 .....	63
Figura 27 .....	64
Figura 28 .....	65
Figura 29 .....	65
Figura 30 .....	66
Figura 31 .....	67
Figura 32 .....	69

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 .....	12
Tabla 2 .....	16
Tabla 3 .....	17
Tabla 4 .....	18
Tabla 5 .....	18
Tabla 6 .....	19
Tabla 7 .....	19
Tabla 8 .....	20
Tabla 9 .....	21
Tabla 10 .....	21
Tabla 11 .....	22
Tabla 12 .....	27
Tabla 13 .....	34
Tabla 14 .....	38
Tabla 15 .....	43
Tabla 16 .....	49
Tabla 17 .....	58
Tabla 18 .....	67

## Resumen

**Título:** Análisis exploratorio del comportamiento geomecánico de materiales granulares marginales compactados por el método giratorio<sup>1</sup>.

**Autor:** Sebastián Vallejo Quintero<sup>2</sup>.

**Palabras Clave:** Material granular marginal, subbase granular, índice de plasticidad, compactador giratorio, succión, módulo resiliente, ciclo secado-humedecimiento.

### Descripción

La investigación estudia experimentalmente el comportamiento geomecánico de cinco materiales granulares marginales (MGM) y un material de control tipo subbase granular, teniendo en cuenta contenidos de finos del 18% y 24% e índices de plasticidad (IP) de 8%, 12%, y 15%. La fase experimental incluyó la aplicación de un ciclo de secado-humedecimiento y la medición de rigidez y succión como determinaciones iniciales para la caracterización de los materiales.

La primera fase del proyecto es la caracterización básica de los MGM partiendo de material de cantera de donde se toman gravas y arenas teniendo en cuenta la granulometría de la subbase granular SBG-38 establecida por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Posteriormente se define la proporción de caolinita, bentonita y triturado en reemplazo del material fino original (proveniente de cantera) buscando variar el contenido de finos e IP objetivo de la subbase granular con respecto a la normativa INVIAS que especifica un valor máximo de 6%. Después, se compactan los materiales mediante el Compactador Giratorio Superpave (SGC) teniendo en cuenta la humedad óptima y la densidad máxima seca de cada MGM. Después se realiza la medición de rigidez (i.e., módulo resiliente) mediante el ensayo triaxial dinámico y se inicia el ciclo de secado-humedecimiento con el fin de medir rigidez y succión en cada estado de humedad. Los resultados sugieren que el material MGM 3 (que posee 18% contenido de finos y 15% de IP) y el material MGM 7 (24% de contenido de finos y 8% de IP) presentan las propiedades más cercanas de rigidez con respecto al material de control SBG-38 (8.5% contenido de finos y 0% de IP). A medida que se disminuyó la humedad en -2 y -1 puntos porcentuales, respecto a la humedad óptima de compactación, durante el ciclo de secado-humedecimiento, se evidenció que los valores de rigidez aumentaron para los MGM a excepción del material MGM 3. El material MGM 7 presenta mayores valores de succión y podría tener un mejor comportamiento en términos de rigidez y resistencia por contacto entre agregados. No obstante, el material MGM 7 presenta la mayor deformación plástica en la condición inicial del ciclo de secado-humedecimiento. Respecto a los resultados de deformación plástica, se concluye que se presenta un valor máximo en la condición inicial del ciclo de secado-humedecimiento, donde se evalúa el material a la humedad óptima de compactación, la cual a su vez presenta los menores valores de succión.

---

<sup>1</sup> Tesis de maestría

<sup>2</sup> Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: Alex Eduardo Alvarez Lugo, Ph.D. Ingeniería. Codirector: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes, Ph.D. Ingeniería.

### Abstract

**Title:** Exploratory analysis of the geomechanical behavior of marginal granular materials compacted by the gyratory method<sup>3</sup>.

**Authors:** Sebastián Vallejo Quintero<sup>4</sup>.

**Keywords:** Marginal granular material, granular subbase, plasticity index, gyratory compactor, suction, resilient modulus, drying-wetting cycle.

### Description

The research studied the geomechanical behavior of five marginal granular materials (MGMs) and a control granular material (i.e., granular subbase), considering fine contents of 18% and 24% and plasticity index (PI) values of 8%, 12%, and 15%. The experimental phase included the application of a drying-wetting cycle and the measurement of stiffness and suction as initial determinations for material characterization. The project's first phase is the basic characterization of the MGM, starting from the quarry material to gather gravel- and sands-fractions in accordance with the gradation of the granular subbase SBG-38 established by the National Roads Institute (INVIAS-Colombia). Then, the proportion of kaolinite, bentonite, and crushed material is defined to replace the fine fraction of the quarry material, seeking to vary the content of fines and PI of the granular subbase with respect to the INVIAS standard (i.e., maximum specified value of 6%). Afterward, the materials were compacted using the Superpave Gyratory Compactor (SGC), considering each MGM's optimum moisture content and maximum dry density. Then, the stiffness (i.e., resilient modulus) was determined using the dynamic triaxial test, and the drying-wetting cycle was started to measure stiffness and suction in each moisture state. The results suggest that material MGM 3 (18% fines content and 15% PI) and material MGM 7 (24% fines content and 8% PI) present the closest stiffness properties compared to the control material SBG-38 (8.5% fines content and 0% PI). As the moisture content decreased by -2 and -1 percentage points (with respect to the optimum moisture content for compaction) during the drying-wetting cycle, it was evidenced that the stiffness values increased for the MGMs, except for MGM 3. Material MGM 7 presents higher suction values and could perform better in stiffness and strength due to aggregate contact. However, material MGM 7 shows the highest plastic deformation in the initial condition of the drying-wetting cycle. Regarding the results of plastic deformation, it is concluded that a maximum value is presented in the initial state of the drying-wetting cycle (when the material is evaluated at the optimum moisture content), which shows the smallest suction values.

---

<sup>3</sup> Master's Thesis

<sup>4</sup> Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: Alex Eduardo Alvarez Lugo, Ph.D. Ingeniería. Codirector: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes, Ph.D. Ingeniería.

### **Introducción**

Para incrementar el desarrollo de la economía nacional es necesaria la inversión en construcción, mantenimiento, rehabilitación, y reconstrucción de vías terciarias ya que el nivel de servicio de esta red vial afecta directamente en costos de transporte y facilidades de acceso del sector agroindustrial y turístico, entre otros. En este contexto, la infraestructura de transporte de mayor extensión en Colombia es la red vial terciaria; su funcionamiento en óptimos niveles mejora el crecimiento económico de la población rural, articula centros de producción rural con acopios urbanos y su respectiva distribución; como consecuencia positiva promueve oferta de servicios públicos, seguridad, salud, y educación. Según el Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES 4039, 2021) las vías terciarias representan el 70% de las vías totales del país y sólo el 15.5% en afirmado están en buen estado. Para incrementar el mantenimiento de vías terciarias (afirmado) y cumplir las especificaciones del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) (INVIAS, 2022) es necesario recorrer largas distancias con el objetivo de acceder a materiales de calidad estándar, lo que ocasiona sobrecostos y limitantes para abastecer el volumen de material necesario. Adicionalmente, esta situación conlleva a una problemática ambiental ya que actualmente el transporte en procesos de construcción es la actividad con mayor relevancia en la huella de carbono (García-Ochoa et al., 2020).

Con base en lo anterior, es necesario analizar alternativas con los materiales granulados marginales (MGM). Los MGM son aquellos materiales que a pesar de no cumplir con las especificaciones de calidad mínimas para los materiales de pavimentación (e.g., especificaciones INVIAS) (INVIAS, 2022) tienen el potencial de ser utilizados con éxito en algunas aplicaciones manteniendo las propiedades mínimas (Cáceres, 2021). Esto con el fin de aprovechar el uso de materiales cercanos a la zona a intervenir y optimizar costos generando viabilidad para los presupuestos destinados al desarrollo de las vías terciarias. El empleo de

MGMs en este trabajo abarca la caracterización y análisis de la succión, el IP, y el contenido de finos, y como pueden afectar estas variables el comportamiento de los MGMs en términos de rigidez y deformación permanente, comparando estas propiedades con las de un material de subbase convencional o de control.

Para entender el comportamiento geomecánico de los MGMs es necesario analizar deformaciones resilientes a medida que se aplica un ciclo de secado-humedecimiento que es lo que sucede en las estructuras de pavimento bajo cargas dinámicas vehiculares a lo largo de los años al verse expuestas a eventos de precipitación y evo transpiración. El ensayo triaxial dinámico permite analizar este comportamiento mediante el cálculo del módulo resiliente, evaluado en este caso empleando probetas compactadas por el método giratorio. El compactador giratorio es conocido por simular de mejor manera la compactación in situ respecto al compactador vibratorio y Proctor, y se pueden compactar muestras de hasta 150 mm de diámetro empleando las variables de presión vertical, altura, ángulo de giro, densidad, humedad, velocidad de rotación, y número de giros (Gelves, 2022).

Actualmente, los estudios sobre MGMs están enfocados generalmente a la construcción de rellenos en terraplén. Este estudio busca explorar y potencialmente promover el análisis de dichos materiales en estructuras de pavimento para vías terciarias. Para ello, se busca evaluar la respuesta geomecánica del material granular marginal mediante probetas en tres estados consecutivos: compactación inicial, trayectoria de secado y trayectoria de humedecimiento. En dichos estados se cuantifica la rigidez a través del ensayo triaxial dinámico. Para este fin, se probaron probetas con diferentes combinaciones de contenido de finos e IP. Por otra parte, se determinaron valores de succión total en los tres estados de análisis para así obtener curvas de retención y módulo resiliente según el estado de humedad. Esto permitirá tener una base de

análisis preliminar del comportamiento de los MGM con porcentaje de finos del 18% y 24% e índice de plastificad del 8%, 12% y 15% al ser usados en una capa granular de una estructura de pavimento bajo el efecto de cargas vehiculares y la interacción con el ambiente.

Los principales resultados de esta investigación buscan definir una alternativa de aplicabilidad en materiales de construcción en estructuras de pavimento, ya que los materiales granulares considerados “no aptos” abundan en gran parte del territorio nacional permitiendo potencialmente su utilización para el beneficio económico y ambiental. En la Tabla 1 se observan las combinaciones de índices de plasticidad y contenido de finos de cada MGM estudiado. En la Figura 1 se presentan las curvas granulométricas que se emplearán para cada MGM y se evidencia la marginalidad de los MGMs por no cumplir con las especificaciones establecidas por el INVIAS en Colombia para el contenido de finos, superando el límite superior (INVIAS, 2022).

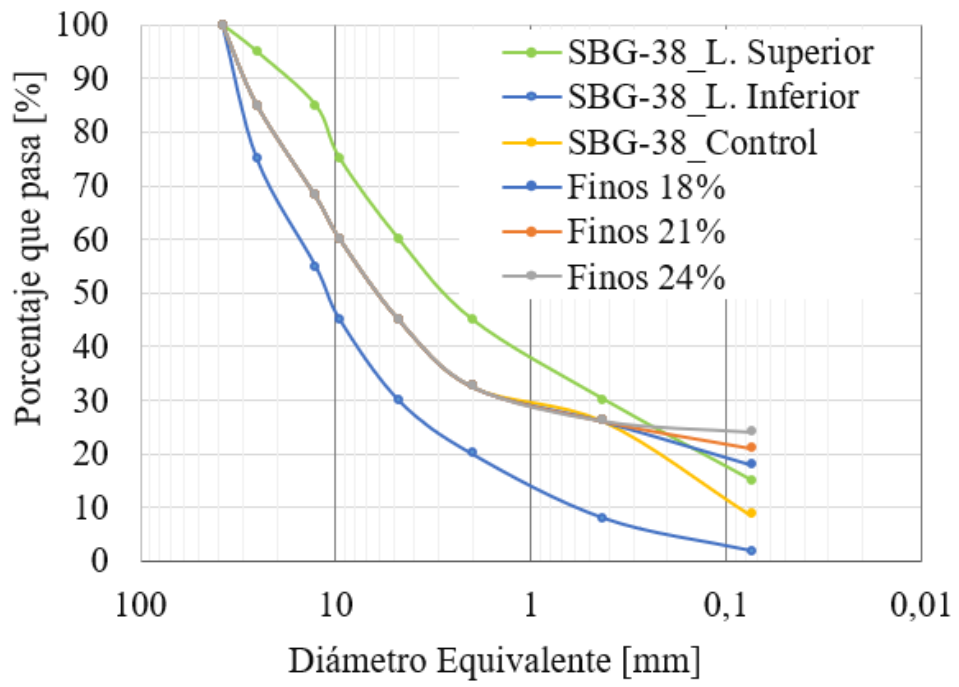
**Tabla 1**

*Tabla de materiales y ensayos ejecutados*

		MGM-1	MGM-2	MGM-3	MGM-7	MGM-8	SBG 38
Finos (%)	8.5%						X
	18%	X	X	X			
	24%				X	X	
IP (%)	8%	X			X		
	12%		X			X	
	15%			X			
Ensayo triaxial		3	3	3	2	3	3
Medición de succión		2	2	2	2	2	2

**Figura 1**

*Granulometría de diseño*



## **1 Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Evaluar la rigidez y deformación permanente de MGMs en condiciones iniciales y después de sometidos a un ciclo de secado y humedecimiento.

### **1.2 Objetivos Específicos**

- Evaluar la rigidez y deformación permanente de probetas compactadas de MGMs caracterizados por contener diferentes porcentajes de finos (18% y 24%) e índices de plasticidad (8%, 12%, y 15%).
- Evaluar la rigidez y deformación permanente de muestras compactadas de MGMs sometidas a un ciclo de secado y humedecimiento.
- Evaluar la succión total en estados de trayectoria de secado y humedecimiento en condición transitoria de las muestras compactadas de MGM.

## **2 Marco Teórico**

Los MGM son aquellos que no cumplen completamente con las especificaciones vigentes para ser utilizados como materiales de construcción de pavimentos. Actualmente, la especificación del INVIAS (INVIAS, 2022) clasifica estos materiales marginales dentro de los suelos inadecuados, por lo que se tiene menor disponibilidad de materiales para la construcción de vías terciarias. A continuación, se presentan los elementos teóricos más relevantes afines al desarrollo del proyecto, los cuales están enfocados a subbases granulares; material que se toma como referente primario en este trabajo.

### **2.1 Material tipo subbase**

Los materiales para subbase provienen de depósitos aluviales o canteras de explotación y generalmente son libres de terrones de arcilla, materiales vegetales, u otros elementos extraños. El material de subbase está compuesto por fracciones de grava, arena, y finos con plasticidad limitada; dependiendo de los parámetros mínimos establecidos por cada agencia vial, un material granular puede ser apto (bajo parámetros de calidad estándar) o marginal. A continuación, se presentan algunas de las agencias viales a nivel mundial que clasifican los materiales granulares tipo subbase con el fin de comparar los materiales empleados en el presente trabajo.

#### ***2.1.1 Instituto nacional de vías – INVIAS***

En Colombia la especificación técnica de calidad para materiales de subbase granular está regida por INVIAS (INVIAS, 2022), en el subcapítulo 320.2.2 del artículo 320-22 “Subbase granular”. Esta especificación tipifica tres clases de subbase granular en función del nivel de tránsito de la estructura de pavimento NT3, NT2 y NT1 (Clase a, Clase B y Clase C respectivamente) como se observa en la Tabla 2.

**Tabla 2***Requisitos de los agregados para sub-bases granulares - INVIAS*

Ensayo	Norma	Subbase granular		
		Clase A	Clase B	Clase C
Desgaste en la máquina de los ángeles (Gradación A), máximo (%) - 500 revoluciones (%)	E-218	50	50	50
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	E-238	30	35	-
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%)	E-220			
- Sulfato de sodio		12	12	12
- Sulfato de magnesio		18	18	18
Limite líquido, máximo (%)	E-125	25	25	25
IP, mínimo (%)	E-125 y E-126	6	6	6
Equivalente de arena, mínimo (%)	E-133	25	25	25
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznable, máximo (%)	E-211	2	2	2
CBR (%): Porcentaje asociado al valor mínimo especificado de la densidad seca, medido en una muestra sometida a cuatro días de inmersión, mínimo.	E-148	40	30	30

Nota. Tomado de (INVIAS, 2022)

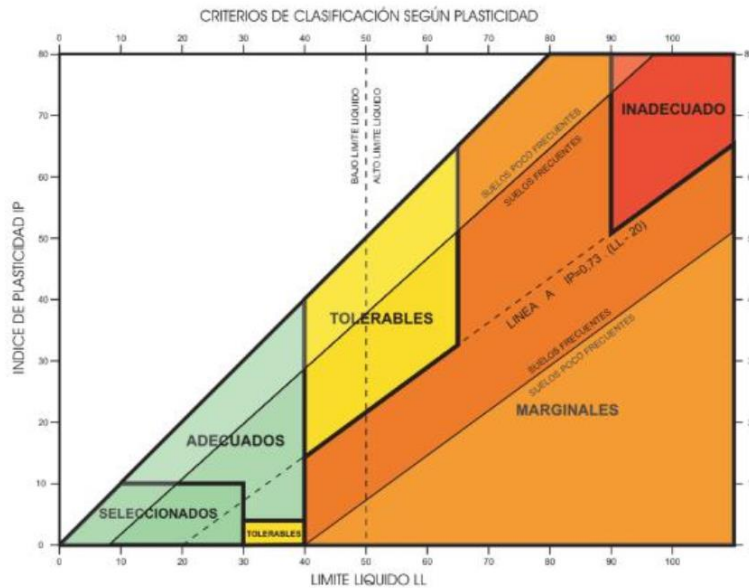
### **2.1.2 Ministerio de Fomento (España)**

En España se han estudiado los MGM en el área de terraplenes. El artículo 330 del Pliego de Prescripciones Técnicas para Obras de Carretera y Puentes (PG-3) (Ministerio Fomento, 2001) clasifica los materiales en seleccionados, adecuados, tolerables, marginales e inadecuados con criterios indicados a continuación:

Plasticidad: propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin variaciones volumétricas apreciables o romperse. En la Figura 2 se presentan los criterios de clasificación por plasticidad.

**Figura 2**

*Criterios de clasificación del suelo por plasticidad usado en terraplenes*



Nota. Tomado de (Gelves, 2022)

Contenido de materia orgánica: el PG-3 establece contenidos de materia orgánica máximos para cada tipo de suelo como se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Contenido máximo de materia orgánica según PG-3 Art. 330-2002*

Tipo de suelo	Contenido máximo de materia orgánica (%)
Seleccionado	0,2
Adecuado	1
Tolerable	2
Marginal	Según apartado 330.4.4.5, pero siempre <5%

Nota. Tomado de (Gelves, 2022)

Colapsabilidad: característica de los suelos con baja densidad y grado de humedad, presentando alto contenido de vacíos. La saturación de estos suelos produce colapso, es decir, asentamiento brusco del suelo. En la Tabla 4 se presentan los porcentajes de asentamientos permitidos en el ensayo de colapso regidos por PG-3 Art. 330-2002.

**Tabla 4**

*Porcentaje de asentamiento en el ensayo de colapso según PG-3 Art. 330-2002*

Tipo de suelo	Asentamiento en el ensayo de colapso (%)
Seleccionado	-
Adecuado	-
Tolerable	<1
Marginal	>1

Nota. Tomado de (Gelves, 2022)

Expansividad: Característica del suelo para expandirse o contraerse causando afectaciones. Se puede medir mediante el ensayo de expansión libre, entre otros. En la Tabla 5 se presentan los valores permitidos para cada suelo.

**Tabla 5**

*Requerimientos de hinchamiento libre (expansión) según PG-3 Art. 330-2002*

Tipo de suelo	Hinchamiento libre (HL %)
Seleccionado	-
Adecuado	-
Tolerable	HL<3%
Marginal	3%<HL>5%

Nota. Tomado de (Gelves, 2022)

CBR: Es el parámetro más común usado en carreteras para determinar la capacidad de soporte del suelo. El PG-3 establece la posibilidad de usar MGMs con un valor de CBR mayor o igual a 3%. En el artículo 500 de esta norma, se mencionan los requisitos mínimos que deben tener los materiales de subbase detallados en la Tabla 6.

**Tabla 6**

*Requisitos para materiales de subbase según PG-3 Art. 330-2002.*

Ensayo	Requisito
Desgaste en la máquina de los ángeles (máximo)	40% (excepto para el uso ZNA <sup>1</sup> donde será máximo 50%)
Contenido de terrones de arcilla	0%
Contenido de materia orgánica	0%
Equivalente de arena (mínimo)	30% (excepto para el uso ZNA donde será 25%)
CBR (mínimo)	20%

<sup>1</sup> ZNA se refiere a una franja granulométrica permitida para el material tipo subbase. Tomado de (Gelves, 2022)

### *2.1.3 Oficina Nacional de Normalización (NC) (Cuba)*

En Cuba la norma NC 334 de 2004 de la Oficina Nacional de Normalización (Martínez, 2013) rige el diseño de estructuras de pavimento. En la Tabla 7 se presentan los parámetros mínimos que deben tener los materiales de base y subbase para la conformación de pavimentos.

**Tabla 7**

*Requisitos para materiales de base y subbase según la norma NC 334:2004.*

Parámetro	Material de base		Material de subbase	
	$\sum N < 5 \times 10^5$ ejes de 100 kN	$\sum N > 5 \times 10^5$ ejes de 100 kN	Drenaje desfavorable	Drenaje favorable
CBR (mínimo)	60-80%	80-100%	20-30%	20-30%
Límite líquido (máximo)	25%	25%	25%	35%
IP (máximo)	6%	6%	6%	10%
Equivalente de arena (mínimo)	30%	50%	-	-

Nota. Tomado de (Gelves, 2022)

La norma NC 334 de 2004 (Martínez, 2013) especifica que cuando los materiales de base o subbase sobrepasen un IP de 6% deben compactarse como mínimo a una densidad del 95% del valor máximo obtenido en el ensayo Proctor modificado. Para el caso en que el IP sea

menor que 6% se alcanzarán densidades iguales o superiores al 100% del ensayo Proctor modificado.

#### **2.1.4 Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC)(Perú)**

En el caso de Perú, el Manual de Carreteras R.D. N°22-2013-MTC/14 (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013), se enuncian los parámetros requeridos para la construcción de carreteras. En el numeral 402.02 de dicho manual se encuentran los requerimientos para un material de subbase granular los cuales se muestran en la Tabla 8.

**Tabla 8**

*Requisitos para materiales de subbase según la norma MTC/14.*

Ensayo	Norma MTC	Requerimiento	
		<3000 m.s.n.m.	>3000 m.s.n.m.
Abrasión máquina de los ángeles	MTC E 207	50% máximo	50% máximo
CBR	MTC E 132	40% máximo	40% máximo
Límite líquido	MTC E 110	25% máximo	25% máximo
IP	MTC E 111	6% máximo	4% máximo
Equivalente de arena	MTC E 114	25% máximo	35% máximo
Sales solubles	MTC 219	1% máximo	1% máximo
Partículas planas y alargadas	-	20% máximo	20% máximo

Nota. Tomado de (Gelves, 2022)

#### **2.1.5 Ministerio de Obras Públicas (MOP) (Chile)**

Según el Manual de Carreteras de Chile (Ministerio de Obras Públicas, 2022) en el capítulo “Subbases granulares” se encuentran los parámetros mínimos para el material de subbase de granulometría cerrada. Para sitios que sufren hielo y deshielo se especifica granulometría abierta, empleando los requisitos de la Tabla 9 exceptuando que se podrá usar un IP máximo de 4%.

**Tabla 9**

*Requisitos para materiales de subbase según la norma emitida por MOP.*

Ensayo	Exigencia	Método
Límite líquido	35% máximo	8.102.3
IP	8% máximo	8.102.4
Desgaste máquina de los ángeles	40% máximo	8.202.11
Sales solubles	4% máximo	8.202.18
CBR	40% máximo	8.102.11

Nota. Tomado de Gelves (2022).

**2.1.6 Federal Highway Administration (FHWA) y American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (Estados Unidos)**

La norma FP-14 de la Administración Federal de Carreteras, en su numeral 703.0 (Federal Lands Highway, 2022) establece las especificaciones para material de subbase (Tabla 10).

**Tabla 10**

*Requisitos para materiales de subbase según la FP-14.*

Ensayo	Especificación
Abrasión máquina de los ángeles	50%
Solidez de los agregados en sulfato de sodio (máximo)	12%
Límite líquido (máximo)	25%
Índice de durabilidad (mínimo)	35%
Caras fracturadas (mínimo)	50%
Materia orgánica o contenido de arcillas	0%

Nota. Tomado de Gelves (2022).

Así mismo, la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (Corley, 2021) define los requisitos para material de subbase indicados en la Tabla 11.

**Tabla 11**

*Requisitos para materiales de subbase según la AASHTO.*

Ensayo	Especificación
Abrasión máquina de los ángeles	50%
Límite líquido (máximo)	25%
IP (máximo)	6%
Contenido de materia orgánica	35%

Nota. Tomado de Gelves (2022).

### ***2.1.7 Transit New Zealand (TNZ) (Nueva Zelanda)***

En Nueva Zelanda, la guía TNZ M/3 (Transit New Zealand, 1986) advierte que no es conveniente estandarizar parámetros para material de subbase granular debido a la variabilidad de materiales que pueden ser usados como subbase. Por lo tanto, lo recomendado es realizar una guía específica para cada proyecto y material evaluando las recomendaciones y verificaciones descritas en la guía TNZ M/3 abriendo la posibilidad de utilizar MGM's bajo ciertas condiciones de acuerdo con las necesidades del proyecto.

### **2.2 Compactación por método giratorio**

La compactación giratoria consiste en la aplicación de acciones simultaneas como la presión vertical y la acción giratoria con un ángulo de inclinación respecto al eje vertical, simulando los procesos constructivos en obra (i.e., compactación estática y amasado (Fernanda et al., 2007)). Este compactador se considera un método eficaz respecto a otros controlando un mayor número de variables como altura, densidad, y número de giros.

Para las probetas compactadas en el presente estudio se utilizó este método ya que se busca asemejar las condiciones reales de un material de subbase compactado en una estructura de pavimento. En la Figura 3 se observa el compactador giratorio utilizado.

**Figura 3**

*Compactador giratorio localizado en el laboratorio Álvaro Beltrán Pinzón – UIS.*

**2.3 Succión del suelo**

El término “succión del suelo” fue usado por Schofield, (1935) para representar la “deficiencia de presión” en el agua de poros de algunos suelos (saturados o no saturados) que tenían la capacidad de absorber agua si se le adicionaba agua a la presión atmosférica. El término succión hace referencia al estado de tensiones que tiene en cuenta los efectos de superficie que retienen agua dentro de la estructura de un suelo parcialmente saturado. El efecto de la succión en un suelo no saturado es equivalente al de una presión exterior aplicada (Barrera-Bucio & Garnica-Anguas, 2002).

La succión total es la presión negativa con respecto a la presión atmosférica que debe aplicarse al agua, químicamente pura, que se encuentra en un depósito, para que alcance el equilibrio con el agua del suelo a través de una membrana semipermeable (Figuroa, 2008). Ridley (1993) (Meza, 2012) la define como la energía requerida para remover una molécula de agua de la matriz de suelo por medio de la evaporación.

## 2.4 Curva de retención de agua del suelo

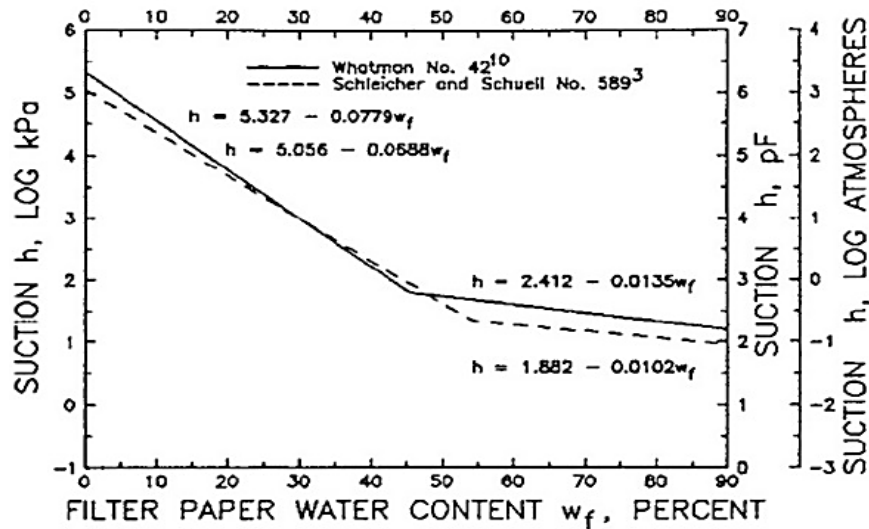
Las curvas de retención de agua en el suelo expresan la relación entre el contenido de humedad y su potencial matricial (succión) reflejando la capacidad del suelo para retener agua a diferentes tensiones en función de la succión.

## 2.5 Técnica del papel filtro para medición de succión

Este método consiste en el uso de papeles de filtro como sensores pasivos para estimar la succión total del suelo (INVIAS, 2022). Esta técnica contempla la determinación del contenido de humedad del papel filtro, el cual puede no estar en contacto directo con la muestra para estimar indirectamente la succión total por medio de las ecuaciones de calibración (E-159 INVIAS, 2013). En la Figura 4 se observa la curva succión vs humedad del papel filtro, presentada por Fawcett y Collis (1967) para un papel filtro número 42 (E-159 INVIAS, 2013).

**Figura 4**

*Curvas de calibración Succión vs Humedad para papel filtro*



Nota: Tomado de la norma INVIAS E-159-13.

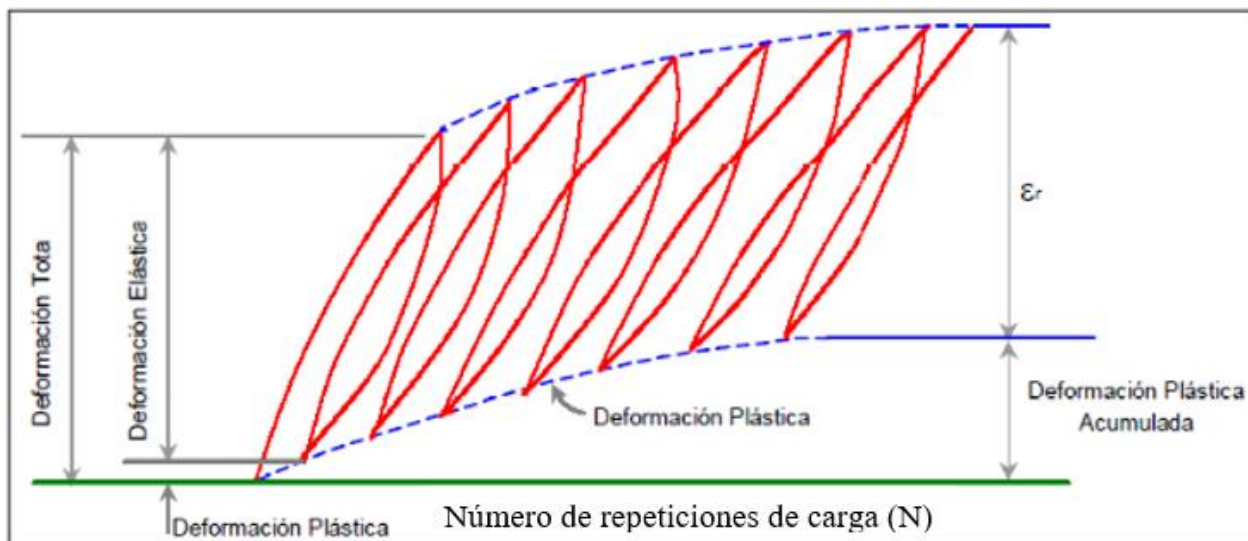
## 2.6 Módulo resiliente

El módulo resiliente en los suelos indica la rigidez del material y se define como la relación que existe entre la magnitud del esfuerzo desviador cíclico en compresión triaxial y la deformación axial recuperable o resiliente. Con el módulo resiliente es posible predecir la respuesta mecánica de una estructura de pavimento, en términos de esfuerzos y deformaciones, al integrarlo, por ejemplo, en un modelo elástico multicapa.

El módulo resiliente se determina mediante el ensayo triaxial dinámico en probetas cilíndricas. Las probetas de suelo son compactadas y sometidas en el ensayo triaxial a una presión de confinamiento,  $\sigma_3$ , y a un esfuerzo desviador,  $\sigma_d$ . Este estado de esfuerzos tiene como objetivo reproducir la condición del suelo cuando es sometido a las cargas sucesivas del tránsito de vehículos. En la Figura 5 se observa la respuesta típica esperada en este ensayo en relación con el comportamiento resiliente y plástico de materiales granulares.

**Figura 5**

*Deformaciones bajo carga repetida*



Nota: Editada a partir de (Francisco & Tuco, 2010).

A partir de este ensayo se define matemáticamente el módulo resiliente (MR) del material según la Ecuación 1.

### **Ecuación 1**

*Módulo resiliente*

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$

Donde  $\sigma_d$  es el esfuerzo desviador y  $\epsilon_r$  la deformación resiliente. Es importante mencionar que para la determinación del módulo resiliente no se compromete la integridad de la probeta de suelo y esta puede ser usada para muchas pruebas bajo diferentes cargas y condiciones similares de esfuerzo.

#### ***2.6.1 Ensayo triaxial dinámico***

El ensayo triaxial dinámico tiene como fin determinar el módulo resiliente. En este trabajo se empleó la norma de ensayo AASHTO T 307-99 (AASHTO, 2021) para evaluar todas las probetas estudiadas.

El ensayo consiste en la aplicación de un pulso de carga de magnitud fija, con una duración de carga de 100 ms y un periodo de reposo de 900 ms sobre un espécimen cilíndrico (150 mm de diámetro y 200 mm de altura). Durante el ensayo la muestra se somete a un esfuerzo cíclico dinámico y esfuerzo de confinamiento de forma estática proporcionado por una cámara de presión triaxial. La respuesta de deformación recuperable se mide y se utiliza para calcular el módulo resiliente. En la Tabla 12 se presentan los valores de presión de confinamiento, esfuerzo desviador máximo, y repeticiones para cada secuencia de carga empleada en materiales de base y subbase granular.

**Tabla 12**

*Secuencias de carga para materiales de base y subbase según norma AASHTO T 307-99 (2021)*

Sequence No.	Confining Pressure, $S_3$		Max. Axial Stress, $S_{max}$		Cyclic Stress, $S_{cyclic}$		Constant Stress, $0.1S_{max}$		No. of Load Applications
	kPa	psi	kPa	psi	kPa	psi	kPa	psi	
0	103.4	15	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	500-1000
1	20.7	3	20.7	3	18.6	2.7	2.1	0.3	100
2	20.7	3	41.4	6	37.3	5.4	4.1	0.6	100
3	20.7	3	62.1	9	55.9	8.1	6.2	0.9	100
4	34.5	5	34.5	5	31.0	4.5	3.5	0.5	100
5	34.5	5	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
6	34.5	5	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	100
7	68.9	10	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
8	68.9	10	137.9	20	124.1	18.0	13.8	2.0	100
9	68.9	10	206.8	30	186.1	27.0	20.7	3.0	100
10	103.4	15	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
11	103.4	15	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	100
12	103.4	15	206.8	30	186.1	27.0	20.7	3.0	100
13	137.9	20	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	100
14	137.9	20	137.9	20	124.1	18.0	13.8	2.0	100
15	137.9	20	275.8	40	248.2	36.0	27.6	4.0	100

Nota: Tomado de (AASHTO, 2021)

Con base en los esfuerzos definidos en la tabla anterior, la probeta cilíndrica de suelo se somete a diferentes estados de esfuerzo (diferentes presiones de confinamiento y esfuerzos desviadores cíclicos), iniciando con un proceso de acondicionamiento de 500 a 1000 ciclos de carga. Durante el ensayo, se mide, para cada ciclo de carga, el nivel de carga aplicado y la deformación resultante a través de un equipo de adquisición de datos.

En la Figura 6 se ilustra el equipo de ensayo triaxial dinámico empleado para este proyecto. Como se observa en la Figura 6, el pistón neumático aplica los esfuerzos cíclicos sobre la cámara triaxial. Así mismo, la deformación generada por la carga es medida por medio del embolo y dos deformímetros externos.

**Figura 6**

*Ensayo triaxial dinámico del laboratorio Álvaro Beltrán Pinzón – UIS*



### **3 Generalidades**

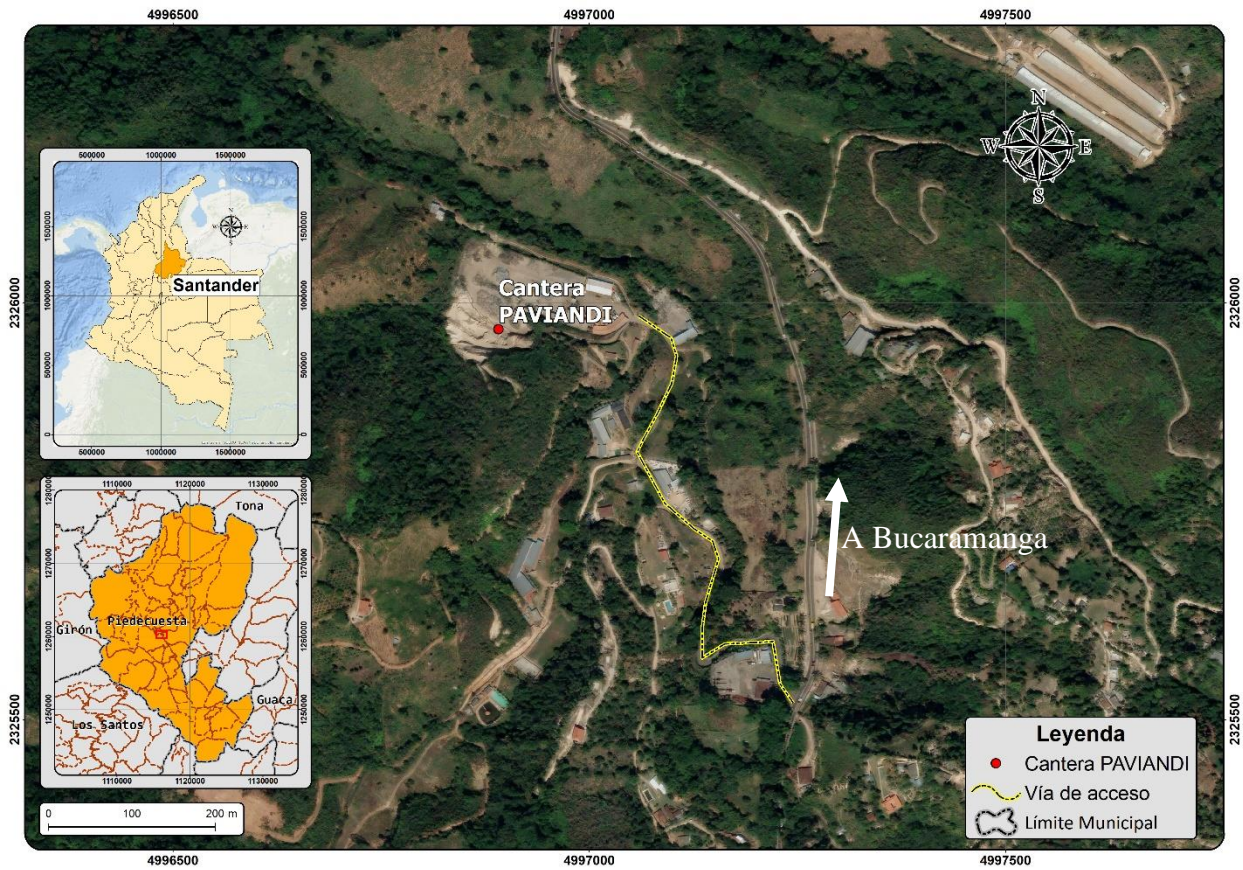
La evaluación realizada tiene como fin determinar el efecto que tiene un ciclo de secado-humedecimiento en probetas de MGM, compactadas por el método giratorio, en términos de cambios de rigidez, variación de humedad, succión, y deformación permanente. Para este fin, se empleó material de la cantera de propiedad de Pavimentos Andinos S.A., cercana al área metropolitana de Bucaramanga, de la cual se extrajo material granular que no cumple con los estándares convencionales de subbase granular definidos por INVIAS. La condición de marginalidad en este caso se debe a las siguientes condiciones: distribución granulométrica, índice de plasticidad, límite líquido, y desgaste en la máquina de los Ángeles. Con este material se compactaron probetas de 0.15 m de diámetro y 0.20 m de altura por el método giratorio en condiciones de densidad máxima y humedad óptima, y se realizaron mediciones de rigidez y succión después de aplicar variaciones de humedad (simulando un ciclo de secado-humedecimiento).

#### **3.1 Localización material de cantera y triturado**

La cantera propiedad de Pavimentos Andinos S.A. se ubica en el km 4.5 vía Aratocha, Santander partiendo del sector conocido como “El Chivo”, como se muestra en la Figura 7.

**Figura 7**

*Localización cantera propiedad de Pavimentos Andinos S.A. (PAVIANDI)*

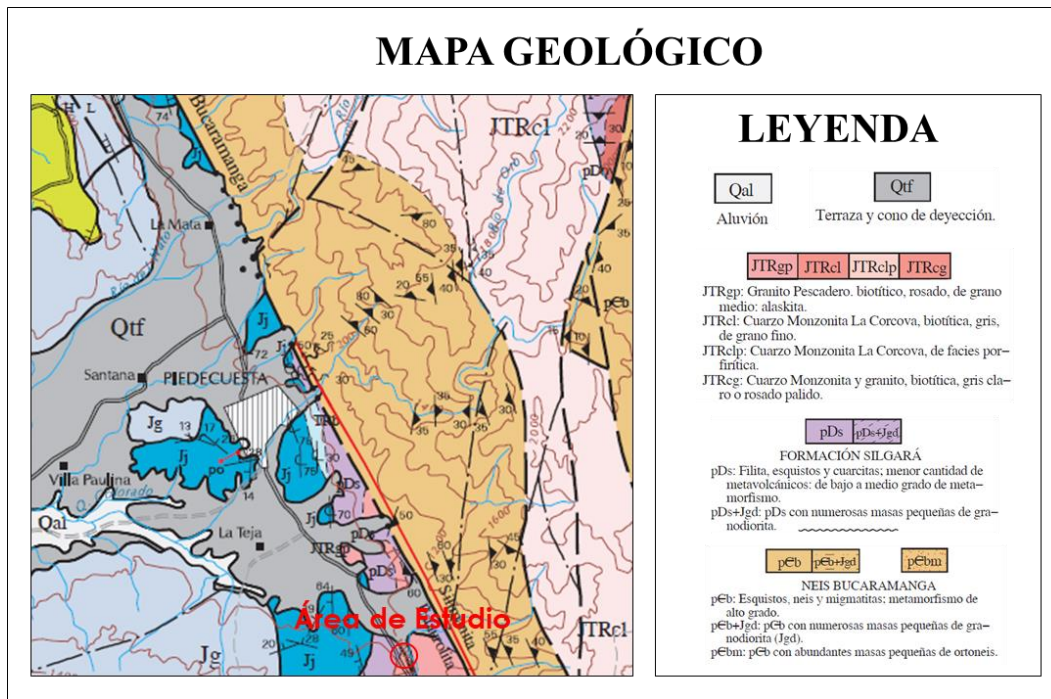


### 3.2 Geología regional

La geología regional que se presenta en la Figura 8 se basa en el estudio realizado por el antiguo INGEOMINAS, para las planchas de Rionegro y Bucaramanga, denominada Cuadrángulo H-12 a escala 1:100.000, elaborado inicialmente en el año 1973. En la descripción geológica solo se tuvo en cuenta las unidades contenidas en el área de estudio.

**Figura 8**

Geología regional cantera Pavimentos Andinos S.A.



Nota: Tomado y modificado de INGEOMINAS 1973.

**3.2.1 Formaci3n silgar3 (pDs)**

Nombre propuesto por Ward, et al. (1973), es una secuencia de rocas cl3sticas metamorfizadas de estratificaci3n delgada, compuestas por filitas, cuarcitas, esquistos, metareniscas y menores cantidades de pizarra y filita calc3rea, cuya secci3n tipo se localiza en la Quebrada Silgar3, afluente del R3o Salamanca, al occidente de C3chira.

Las relaciones estratigr3ficas, las diferencias composicionales y algunos datos estructurales, por lo menos sugieren que la Formaci3n Silgar3 suprayace al Complejo Bucaramanga e infrayace discordantemente a las formaciones El Tibet y Floresta del Dev3nico (SGC, 2001).

### 3.2.2 *Granito de Pescadero (JTRgp)*

El Granito de Pescadero aflora al occidente de la Falla de Bucaramanga en el flanco occidental de la Cordillera Oriental. Está conformado por sienogranitos, monzogranitos y granodioritas, corresponde a rocas holocristalinas con textura hipidiomórfica y alotriomórfica granular, micrográfica y microporfídicas.

Los minerales principales son plagioclasa, cuarzo y feldespato con variados porcentajes de biotita y escasa moscovita. Esta unidad está intruida por diques de cuarzotraquitas, dacitas y basaltos. Las rocas del Granito de Pescadero de las series calcoalcalina alta en K; peraluminosas. Las muestras peraluminosas son posiblemente producto de contaminación con rocas de caja o fusión de corteza continental. El ambiente tectónico corresponde principalmente a granitos tipo S y algunas de tipo I, son rocas orogénicas tardías. En otros diagramas por su química y edades se revelan al menos tres patrones diferentes de distribución de las tierras raras; se clasifican como rocas magmáticas de subducción, el patrón principal es de arco continental maduro y otro de arco continental normal (Royero & Clavijo, 2001).

Las edades del Granito de Pescadero corresponden al Jurásico temprano  $193 \pm 6$  Ma (K-Ar en biotita);  $199,1 \pm 1,3$  Ma (U-Pb) y  $194,8 \pm 3,2$  Ma (U-Pb). El Granito de Pescadero intruye la Formación Silgará de edad paleozoica, y en contacto fallado con el Neis de Bucaramanga, lo cubren inconformemente depósitos cuaternarios (SGC, 2001).

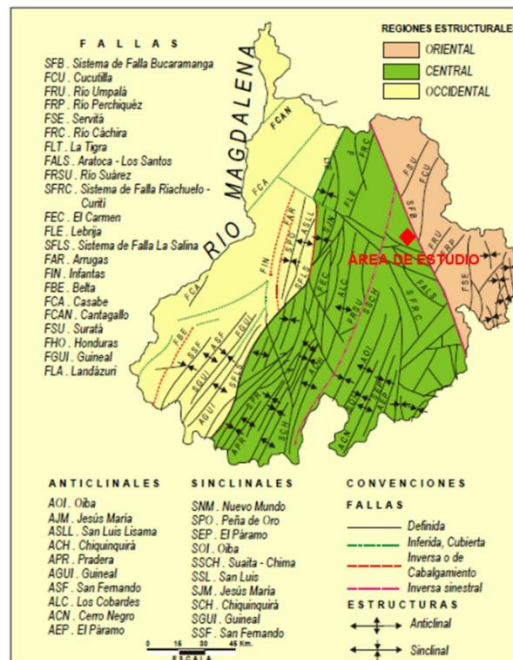
### 3.3 Geología estructural

El nororiente colombiano de Los Andes es un territorio geológicamente complejo y tectónicamente dinámico; su conformación está relacionada con la interacción de las placas tectónicas Nazca, Caribe y Suramérica. El área de Santander por encontrarse dentro de este dominio despierta gran interés y genera discusiones sobre su origen y su conformación

geológica. En la Figura 9 se muestra el esquema estructural que se ha considerado apropiado para el Departamento de Santander

### Figura 9

*Esquema estructural del Departamento de Santander*



Nota. Tomado de (Royero & Clavijo, 2001).

El área de estudio se encuentra cerca del sistema de fallas del Suarez, y el sistema de fallas de Bucaramanga Santa Marta, ubicados en el extremo más oriental del departamento de Santander.

El Departamento de Santander se encuentra localizado en una región tectónica compleja y dinámica, que representa a una zona de influencia entre los límites de las placas tectónicas del Caribe y la suramericana, conocida como bloque Andes del Norte o bloque Norandino. Para la caracterización tectónica del territorio de Santander se ha subdividido en tres provincias tectónicas como son la del Macizo de Santander, que está conformada por los bloques de Floresta, Cucutilla, Pamplona y de Ocaña; la del Valle Medio del Magdalena, y la de la Cordillera Oriental, de conformidad con el esquema tectónico (Royero & Clavijo, 2001).

### 3.4 Calidad del material granular marginal

La distribución granulométrica del material de cantera se encontró ligeramente por encima del contenido de material fino indicado en la especificación INVIAS 320-22 que incluye los requisitos mínimos que se deben tener en cuenta para el transporte, humedecimiento, aireación, colocación, extensión, conformación, compactación, y terminado de material de subbase granular.

Los ensayos mínimos requeridos para caracterizar el material de subbase granular se muestran en la **Tabla 13**, e incluyen desgaste en la máquina de los ángeles y degradación por abrasión en el equipo micro-Deval para evaluar la dureza del material, pérdida en ensayo de solidez en sulfatos para evaluar durabilidad, límite líquido, límite plástico, equivalente en arena, y contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales para observar su limpieza, y el ensayo de CBR para analizar su capacidad de soporte (Gelves, 2022). Se evidenció que el material de cantera no cumple con la granulometría respecto a agregados pétreos para subbase granular, desgaste en la máquina de los ángeles, límite líquido, e índice de plasticidad.

**Tabla 13**

*Resultados de ensayos de caracterización del material granular de cantera*

Ensayo	Norma	Resultado	Especificación	Cumple
Desgaste máquina de los ángeles	INV 218-13	60,73	50% máximo	NO
Perdida en ensayo de solidez en sulfatos	INV 220-13	3,70%	12% máximo	SI
Límite líquido	INV E 125	39,93%	25% máximo	NO
IP	INV E 125 Y E 126	11,39%	6% máximo	NO
Equivalente en arena	INV E 133-13	48%	25% máximo	SI
Gravedad específica (material fino)	INV E 128	2,616	-	-

Nota: Editado de (Gelves, 2022).

## **4 Materiales**

Cómo se mencionó previamente, los MGMs no satisfacen completamente la especificación de calidad INVIAS. En este trabajo se evaluaron cinco MGMs con el fin de comparar la rigidez y succión respecto a un material de control (SBG-38). Para ello, se utilizó material de cantera como base para la preparación de las probetas de MGM y este material base tuvo adiciones para generar condiciones de plasticidad y contenido de finos objetivo. Adicionalmente, se empleó material de trituración (i.e., pasa tamiz 200) para reducir el IP del material de cantera y generar la probeta de control SBG-38 (8.5% de contenido de finos y 0% de IP). Además, se empleó bentonita y caolinita para aumentar el IP (8%, 12%, y 15%) de los cinco MGMs de estudio.

### **4.1 Material de cantera y material de triturado**

El material utilizado para generar las fracciones de arena y grava de las probetas de estudio en condiciones de MGMs fue el extraído de la cantera propiedad de Pavimentos Andinos S.A. El material de cantera presenta un IP (sobre fracción pasa tamiz No 200) de 11%, pérdida por sulfatos de 3.70%, equivalente de arena de 48% (Gelves, 2022), y un valor de DMA de 60.73%.

El material de triturado (fracción pasa tamiz No 200) fue obtenido a través de la trituración de roca en la planta asfáltica de Pavimentos Andinos S.A., se evidenció que este material presenta plasticidad nula, reteniendo baja cantidad de agua en su estructura.

### **4.2 Bentonita y Caolinita**

La bentonita y caolinita empleadas fueron importadas a través de la empresa Comercial Fox S.A.S. ubicada en la vía Mosquera-Soacha, Cundinamarca y tuvieron como objetivo

reemplazar parte de la fracción fina del material de cantera para obtener un IP del 12% teniendo en cuenta que la caolinita presenta un IP de 11.68% y la bentonita de 360%.

La mezcla de material pasa tamiz No. 200 a ensayar para alcanzar un IP de 8% se hizo con material fino de cantera y triturado, mientras que para alcanzar un IP de 12% se realizó una mezcla con material fino de cantera, bentonita y caolinita. En cada ensayo se varió el porcentaje de material triturado y de bentonita respectivamente para así analizar el comportamiento del IP ante esta variación.

Con base en la granulometría de diseño se estableció la cantidad de material requerido de cada fracción para elaborar las probetas de estudio de los cinco MGMs con granulometría controlada (recombinación de fracciones en laboratorio). Para la determinación de la masa requerida de cada fracción, se proyectó la fabricación de probetas de 0.20 m de altura y diámetro de 0.15 m y se adoptó un peso unitario seco inicial de 20 KN/m<sup>3</sup>.

## 5 Metodología

Después de realizar una revisión de literatura acorde al enfoque global del proyecto se llevó a cabo una fase experimental multietapas en la cual cada una de ellas está ligada al alcance y objetivos que se plantean en el trabajo. A continuación, se presentan las etapas de la metodología empleada:

### 5.1 Nomenclatura de ensayos triaxiales

Para cada uno de los cinco MGMs estudiados se realizaron tres ensayos triaxiales para el cálculo de rigidez. La codificación empleada corresponde a:

- MGM#-1 hace referencia al MR calculado después de la compactación de la probeta.
- MGM#-2 hace referencia al MR calculado después de trayectoria de secado en condición transitoria
- MGM#-3 hace referencia al MR calculado después de trayectoria de humedecimiento en condición transitoria

### 5.2 Tamizado de material de cantera y triturado

Se deposita el material en bandejas de aluminio, se extiende, y se procede a tamizar manualmente por los tamices 1 ½", 1", ½", 3/8", y No. 4; el material que pasa el tamiz No. 4 se almacena en sacos de fibra y se tamiza mecánicamente en muestras de 500 g durante 5 minutos por los tamices No. 10, No. 40, y No. 200.

### 5.3 Control de granulometría

La franja granulométrica de trabajo es similar a la granulometría tipo SBG-38 de INVIAS (INVIAS, 2022) pero con variaciones de porcentaje de finos. En este trabajo se emplearon contenidos de finos de 18% y 24% e índices de plasticidad de 8%, 12%, y 15%.

#### 5.4 Análisis de plasticidad (límites de Atterberg)

Se realiza una caracterización del comportamiento del material fino (material pasa No. 200) mediante los ensayos de límites de Atterberg según las normas de ensayo INV 125-13 e INV 126-13 (INVIAS, 2013) del material de cantera, triturado, caolinita, y bentonita.

Para alcanzar el IP de 8%, 12%, y 15% fue necesario realizar una mezcla finos de cantera con material de trituración, caolinita, y bentonita. (ver Tabla 14).

Adicionalmente, debido a que los materiales no reaccionan simultáneamente ante la adición de agua se tiene un tiempo de curado para cada medición de 40 minutos para IP de 8% y 60 minutos para el IP de 12% y 15%.

**Tabla 14**

*Cantidad de material de cantera, caolinita, bentonita y triturado combinados para cada MGM*

Material	Fondo [g]	Finos (%)	IP (%)	Cantera		Caolinita		Bentonita		Triturado	
				%	g	%	g	%	g	%	g
MGM1	1284		8	84,5	1085					15,5	203
MGM2	1294	18	12	49,4	640	49,4	640	1,1	15		
MGM3	1257		15	48,8	614	48,8	614	2,3	29		
MGM7	1719		8	84,5	1453					15,5	266
MGM8	1711	24	12	49,4	846	49,4	846	1,1	19		
SBG 38	609	8,5	0	40	244					60	366

Los valores mostrados en la Tabla 14 fueron obtenidos con base en las ecuaciones 2 y 3. La ecuación 2 se definió a partir de ensayos de límites de Atterberg para mezclas de material fino de cantera y triturado variando la cantidad de triturado para obtener un IP de 0% y 8%; mientras que la ecuación 3 se definió para mezclas de material fino de cantera, caolinita, y bentonita variando la cantidad de bentonita y dejando en proporciones iguales la cantidad de

material de cantera y caolinita; esto para obtener un IP de 12% y 15%. (Martínez Chinchilla & Vargas Prada, 2022).

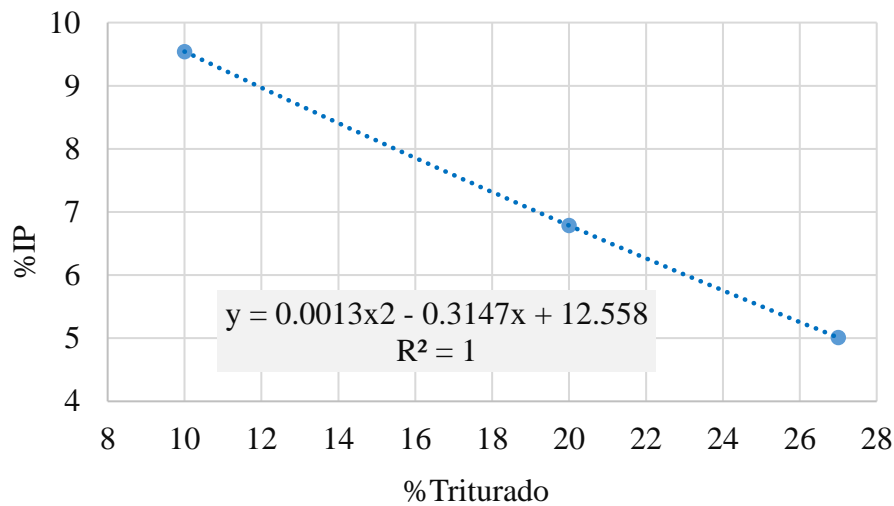
$$IP = -0.0013 * (\%_{\text{triturado}})^2 - 0.3147 * \%_{\text{triturado}} + 12.558 \quad \text{Ecuación 2}$$

$$IP = 0.4543 * (\%_{\text{bentonita}})^2 + 0.9254 * \%_{\text{bentonita}} + 10.363 \quad \text{Ecuación 3}$$

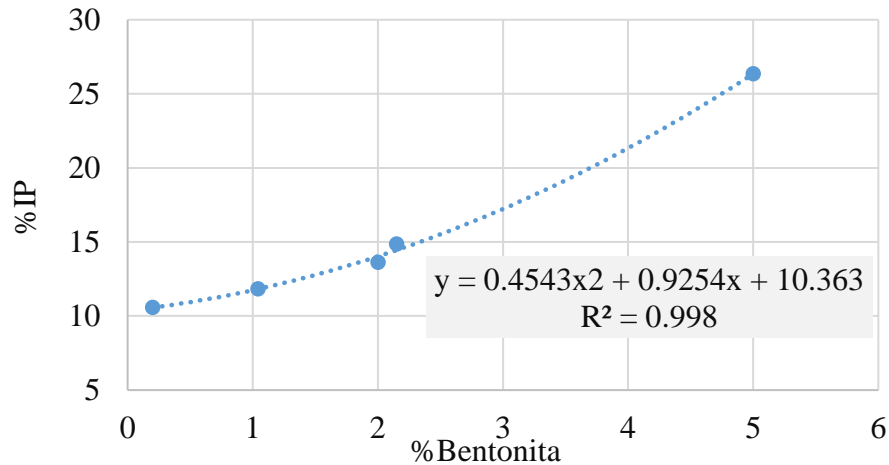
Las ecuaciones anteriormente mencionadas se tomaron a partir de las gráficas de IP versus porcentaje de triturado (Figura 10) y/o porcentaje de bentonita (Figura 11) según correspondía. (Martínez Chinchilla & Vargas Prada, 2022).

**Figura 10**

*Índice de plasticidad vs %material triturado*



Nota. Tomado de (Martínez Chinchilla & Vargas Prada, 2022)

**Figura 11***Índice de plasticidad vs %bentonita*

Nota. Tomado de (Martínez Chinchilla & Vargas Prada, 2022)

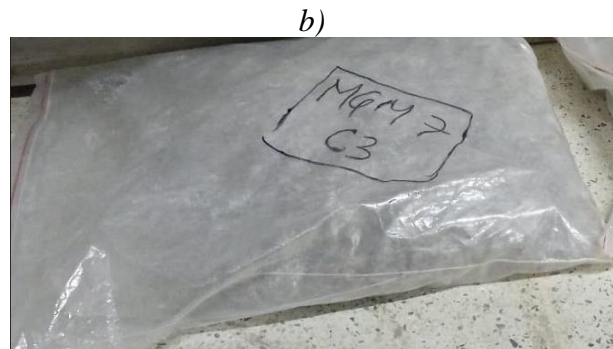
### 5.5 Mezclado y empaquetado

Haciendo uso de una mezcladora mecánica se añade el material para la fabricación de cada MGM y se mezcla por cinco minutos con el volumen de agua requerido para alcanzar la humedad óptima de compactación. Posteriormente, se introduce el material en tres bolsas herméticas y se deja curar por un periodo de 18 a 24 horas, tal como se muestra en la Figura 12.

**Figura 12**

a) *Mezclado de muestras*

b) *Empaquetado de muestras*



### 5.6 Compactación de probetas

Finalizado el periodo de curado, se introduce el material al molde del compactador giratorio. Con el fin de medir la humedad real, se extrae una muestra sobrante del proceso de compactación (200 g aproximadamente) y se seca en horno durante 12 a 16 horas a una temperatura de 110°C. La compactación de las diferentes probetas se realiza mediante un compactador giratorio Superpave (SGC) donde se vierte en tres capas y se compacta en una capa utilizando un molde de 0.15 m de diámetro y 0.30 m de altura, bajo una presión de 600 kPa, ángulo de giro externo de 1.25°, y una velocidad de rotación de 30 revoluciones por minuto. Para realizar la compactación se toma como volumen el de probetas objetivo de 0.15 m de diámetro y 0.20 m de altura y la masa correspondiente a cada MGMs calculada a partir de la densidad máxima teniendo en cuenta la humedad óptima. Por lo tanto, el compactador se detiene cuando alcanza la densidad húmeda máxima objetivo y no por el número de giros, ni altura de la probeta.

Una vez se compacta la probeta (Figura 13), se retira y se pesa para determinar la masa final, se recubre en papel tipo vinipel con el fin de no perder material fino y conservar la humedad. Así mismo, se denota de acuerdo con su nomenclatura.

#### Figura 13

*Probeta compactada por el método giratorio.*



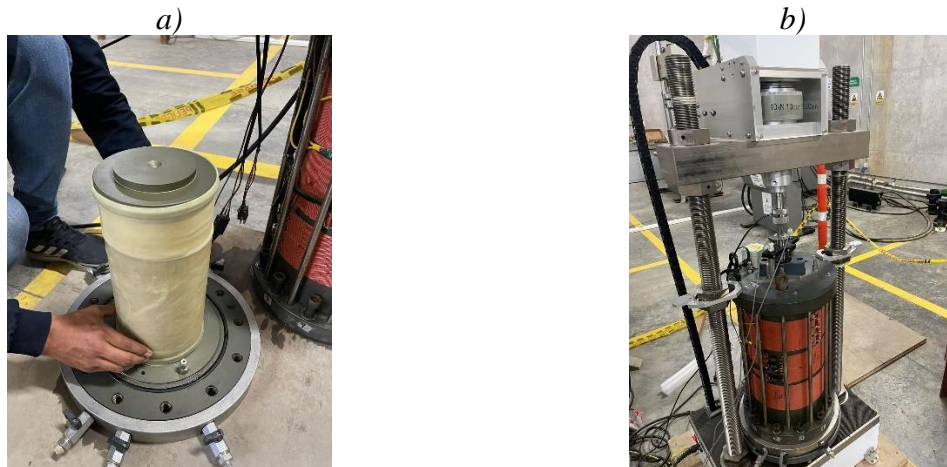
### 5.7 Medición de módulo resiliente (MR) – ‘Condición inicial’

Teniendo las probetas de estudio compactadas, se evaluó el comportamiento resiliente empleando el ensayo triaxial dinámico utilizando el protocolo de ensayo estipulado por American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) en su norma de ensayos T 307-99 (AASHTO, 2021) (ver Tabla 12 y Figura 14).

Después, se somete a ensayo de MR, luego se registra la masa de la probeta y se envuelve en papel tipo vinipel para aislarla evitando posible pérdida de material fino y humedad.

**Figura 14**

- a) *Montaje de probeta para el ensayo*
- b) *Equipo para el ensayo triaxial dinámico*



### 5.8 Trayectoria de secado en condición transitoria

Con el objetivo de evaluar el comportamiento mecánico en un ciclo de secado-humedecimiento, se procede a reducir la humedad de cada MGM, a temperatura ambiente, hasta obtener dos puntos porcentuales menos que la humedad óptima de compactación ( $\%W_{opt} - 2\%$ ) y se registra la masa. Se realizó una determinación del porcentaje de humedad perdida a través

del tiempo en un proceso de secado al aire en el laboratorio con una probeta MGM aleatoria. De esta prueba se obtuvo que se pierde 1% de humedad, aproximadamente, por cada día transcurrido como se muestra en la Tabla 15. Con base en estos resultados, se determinó que el tiempo de secado a temperatura ambiente no debe ser mayor a 2 días.

Posteriormente, se aísla la probeta envuelta en papel tipo vinipel dentro de una cava de poliestireno expandido durante 4 días aproximadamente para posteriormente medir succión.

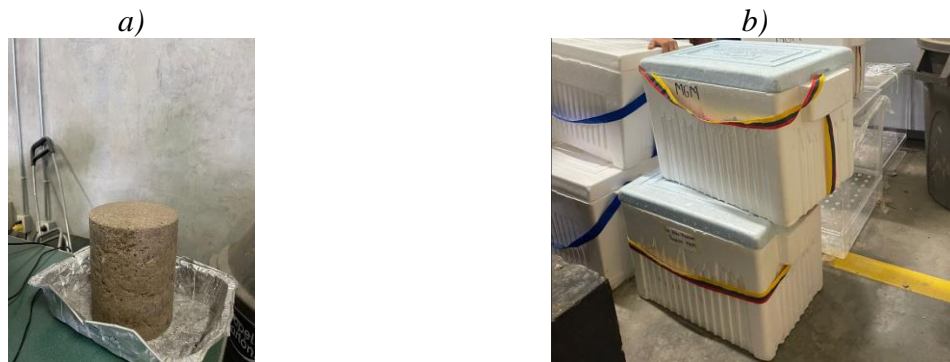
Ver

Figura 15.

**Figura 15**

a) *Secado a temperatura ambiente*

b) *Almacenamiento de probeta en cava de poliestireno expandido*



**Tabla 15**

*Fluctuación de la humedad en el ciclo de secado*

Humedad inicial	Masa [g]	Tiempo [días]	Humedad perdida (%)	Humedad final (%)
9%	7677	0,00	0,00	5.2%
	7663	0,13	0,18	
	7603	0,92	0,96	
	7517	2,13	2,08	
	7463	2,92	2,79	

7454	3,00	2,90
7385	3,83	3,80

### **5.9 Medición de succión total en trayectoria de secado en condición transitoria**

Esta medición está basada en la norma INV E – 159 (E-159 INVIAS, 2013)– 13 y ASTM D 5298 – 10 (Bicalho et al., 2007). Como primera fase, antes de realizar el ensayo triaxial dinámico se secan en el horno los papeles filtro durante 16 a 24 horas, a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ \text{C}$ . Luego se almacenan hasta su uso en bolsas herméticas de plástico para mantener humedad nula.

La probeta de cada MGM estará en contacto con un montaje en caras superior e inferior de las probetas durante la trayectoria de secado en condición transitoria, usando la técnica del papel filtro. Este conjunto de probeta y sándwich se encuentra envuelto en papel tipo vinipel y dentro de la cava simulando un recipiente hermético. Para ello, se retira de la bolsa hermética de plástico un papel de filtro e inmediatamente se coloca sobre el disco acrílico perforado de 0.15 m de diámetro y 0.05 m de espesor; posteriormente, sobre el papel filtro se coloca un disco de acrílico sin perforar de las mismas dimensiones. Seguido a esto se guarda en la cava el conjunto durante 4 días para realizar una correcta medición de succión total. Ver Figura 16.

Finalizado este periodo, se determina la masa de la bolsa hermética ( $T_c$ ) y del papel filtro junto con bolsa ( $M_1$ ). Después, se extrae el papel filtro y se seca durante dos horas a  $110 \pm 5^\circ \text{C}$  para registrar nuevamente su masa dentro de la bolsa hermética de plástico ( $M_2$ ) y la masa final de esta ( $T_h$ ). Este proceso se realizó a cada una de las probetas MGMs compactadas, esto con el fin de tener una relación de la succión con el grado de saturación de cada suelo.

**Figura 16**

a) Estructura tipo sándwich para medición de succión total

b) Determinación de masa papel filtro y bolsa



### 5.10 Medición de módulo resiliente (MR) - Secado

Después de realizar la medición de succión, se mide nuevamente el MR a la probeta que se encontraba en proceso de trayectoria de secado en condición transitoria. Se evalúa el comportamiento resiliente empleando el ensayo triaxial dinámico utilizando el protocolo estipulado por la AASHTO en su norma de ensayo T 307-99 (AASHTO, 2021).

Esta segunda medición de módulo resiliente tendrá nomenclatura MGM#-2, la cual posee densidad máxima y -2 puntos porcentuales de humedad respecto a la humedad óptima de compactación. Finalmente, se registra la masa de la probeta y se envuelve en papel tipo vinipel para aislarla evitando posible pérdida de material fino y humedad.

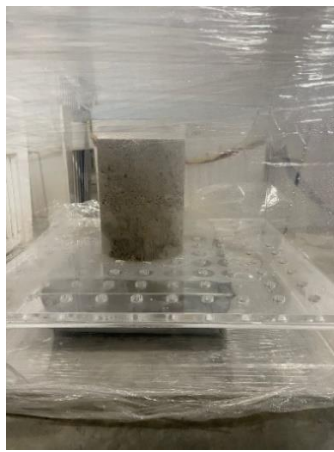
### 5.11 Trayectoria de humedecimiento en condición transitoria

Para seguir con el ciclo de acondicionamiento por humedad, las probetas fueron sometidas a un proceso de trayectoria de humedecimiento en condición transitoria el cual se logró introduciendo las muestras en un box hermético fabricado en acrílico, de dimensiones

0.5x0.5x0.5 m, el cual contiene en su superficie inferior una bandeja en aluminio con agua. Este proceso se realizó durante 7 días, ganando 1 punto porcentual de humedad aproximadamente por día y se instala el conjunto tipo sándwich para medir succión al finalizar este periodo. Ver Figura 17.

### **Figura 17**

*Humedecimiento de probetas en box hermético*



#### **5.12 Medición de succión total en trayectoria de humedecimiento**

Esta medición está basada en la norma INV E – 159 – 13 (E-159 INVIAS, 2013) y ASTM D 5298 – 10 (Bicalho et al., 2007) y en el proceso descrito en el numeral 5.9.

Este proceso se realiza a cada una de las probetas MGMs después de la segunda medición de módulo resiliente; esto con el fin de tener una relación con el grado de saturación de cada suelo en el ciclo secado-humedecimiento.

#### **5.13 Medición de módulo resiliente (MR) - Humedecimiento**

Después de realizar la medición de succión se mide nuevamente el módulo resiliente a la probeta que se encontraba en trayectoria de humedecimiento en condición transitoria. Se evaluó el comportamiento resiliente empleando el ensayo triaxial dinámico utilizando el protocolo de ensayo AASHTO T 307-99 (AASHTO, 2021). Esta tercera medición de módulo

resiliente tendrá nomenclatura MGM#-3, la cual posee densidad máxima y -1 punto porcentual de humedad respecto a la humedad óptima de compactación. Finalmente, se registra la masa de la probeta y se envuelve en papel tipo vinipel para aislarla evitando posible pérdida de material fino y humedad.

## 6 Resultados y Análisis

El análisis y los resultados se basaron en la comparación de las respuestas determinadas para los materiales marginales, MGM 1, MGM 2, MGM 3, MGM 7, y MGM 8, con el material de control (SBG-38), ya que este último presenta un índice de plasticidad y porcentaje de finos que se encuentran dentro del rango aceptado por la especificación INVIAS (INVIAS, 2022). Es importante conocer las especificaciones definidas actualmente por parte de diferentes agencias viales para materiales granulares de subbase, las cuales pueden emplearse como un primer referente de comparación para los MGMs. En la Tabla 16 se presentan los requisitos mínimos para materiales de subbase granular para diferentes entidades viales.

De acuerdo con la información de la Tabla 16 y la presentada en el capítulo de materiales, se evidencia que, para el ensayo de abrasión en la máquina de los Ángeles, el material de cantera posee un índice DMA de 60.7%, lo cual no es aceptado por ninguna normativa de ningún país. En cuanto al equivalente de arena (48%) y la pérdida de solidez en sulfato de sodio (3.70%), el material de cantera cumple con los parámetros mínimos exigidos para subbase granular de cada país. Con respecto al contenido de finos (11%), el material de cantera cumple con la normativa INVIAS, la cual indica un máximo de 15%. Sin embargo, para este proyecto se incrementó el contenido de finos con adición de caolinita, bentonita, y triturado hasta 24%, modificando además los índices de plasticidad.

**Tabla 16***Requisitos mínimos para materiales de subbase granular definidos por diferentes agencias viales*

	COLOMBIA (INVIAS, 2022)		ESPAÑA (Ministerio de Fomento, 2002)	CUBA (NC 334:2004)	PERÚ (Manual de carreteras, EG- 2013)	CHILE (Manual de carreteras, 2018)	ESTADOS UNIDOS		
	Clase A	Clase B y C					FHWA	AASHTO	TxDOT
Abrasión máquina de los ángulos (máximo)	50%	50%	40%	-	50%	35%	50%	50%	-
CBR	30%	40%	20%	20% - 30%	40%	50%	-	-	-
Límite líquido (máximo)	25%	25%	NP	25%	25%	25%	25%	25%	25%
IP (máximo)	6%	6%	NP	6%	6%	8%	7%	4%	10%
Equivalente de arena (mínimo)	25%	25%	30%	-	25%	-	-	-	-
Sales solubles (máximo)	-	-	-	-	-1%	4%	-	-	-
Pérdidas de ensayo de solidez en sulfato de sodio (máximo)	12%	12%	-	-	-	-	12%	-	-
Partículas planas y alargadas (máximo)	-	-	-	-	20%	-	-	-	-
Contenido de finos (máximo)	15%	15%	-	-	-	10%	10%	8%	20%
Contenido de materia orgánica (máximo)	-	-	0%	-	-	-	0%	0%	-

Teniendo en cuenta la granulometría de los materiales estudiados, se puede observar que los MGMs exceden el límite de contenido de finos (15%) especificado por INVIAS (INVIAS, 2022). Sin embargo, la normatividad TxDOT (Texas Department of Transportation, 2022) admite hasta 20%. El índice de plasticidad máximo (10%) definido por TxDOT (Texas Department of Transportation, 2022) y 6% para el Manual de Carreteras en Chile permite un mayor rango para este parámetro.

Se puede concluir que los materiales considerados inadecuados por la norma INVIAS (INVIAS, 2022) para subbases granulares en cuanto a contenido de finos e índices de plasticidad, son considerados adecuados por otras normas viales como el Manual de Carreteras de Chile, FHWA y TxDOT, debido a que presentan un rango más amplio de aceptación.

De acuerdo con lo anterior, el análisis se enfoca principalmente en la influencia de la variación de contenido de finos e IP en materiales no convencionales (MGM) para evaluar el comportamiento en términos del módulo resiliente.

### **6.1 Rigidez**

El análisis de rigidez se realizó para cada MGM teniendo en cuenta los datos obtenidos del ensayo triaxial dinámico a lo largo del ciclo de secado-humedecimiento. A continuación, se realiza la comparación en términos de rigidez de cada MGM respecto al material de control SBG-38.

- MGM 1 (18% contenido de finos y 8% de IP)

Con base en los resultados obtenidos de la Figura 18 se observa que el MR en secado es mayor que el MR en condiciones iniciales; existe un efecto positivo de la succión ya que se disminuyó la humedad, por lo tanto, aumentó el MR.

El MR en secado es mayor al MR en humedecimiento donde se observa una diferencia más alta a bajos esfuerzos de confinamiento (i.e., entre 80 kPa y 350 kPa). A su vez, el MR en humedecimiento es mayor al MR en condiciones iniciales para altos esfuerzos de confinamiento; i.e., entre 350 kPa y 650 kPa.

Comparando los valores de rigidez entre el material de control SBG-38 y los resultados obtenidos por el material MGM 1 (18% contenido de finos y 8% de IP) en condiciones iniciales, se observa que el MR del material de control SBG-38 es mayor al MR del material MGM 1 en un porcentaje promedio de 32%.

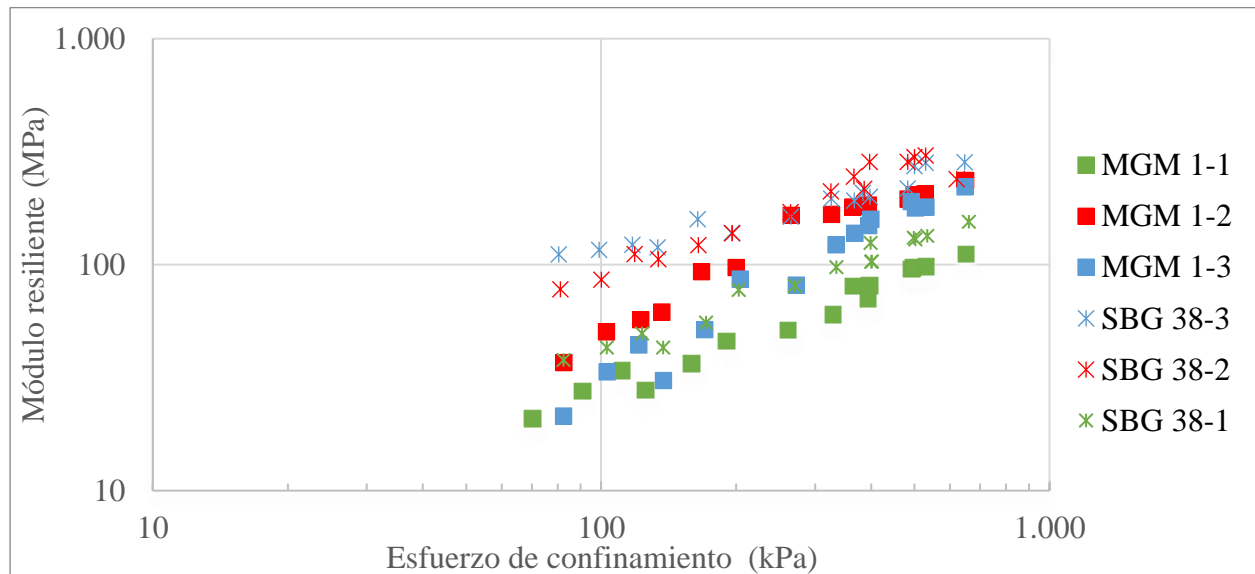
En condiciones de secado el MR del material de control SBG-38 es mayor al MR del material MGM 1 con un efecto más notorio a bajos esfuerzos de confinamiento, entre 80 kPa y 250 kPa.

En condiciones de trayectoria de humedecimiento se observa la misma tendencia que en condiciones de secado, donde la rigidez del material de control SBG-38 es mayor a la del material MGM 1 con efecto más notorio a bajos esfuerzos de confinamiento, comprendidos entre 80 kPa y 270 kPa.

En los dos materiales se evidencia un valor máximo de rigidez después del estado de secado del ciclo.

**Figura 18**

*Módulo resiliente del material MGM 1 a lo largo del ciclo de secado-humedecimiento*



En el análisis de los datos presentados en la Figura 18, se observa que para el material SBG-38 (8.5% contenido de finos y 0% de IP) hay variaciones en el MR en los diferentes estados de saturación: el MR en secado y en humedecimiento es mayor al MR. Adicionalmente, a bajos esfuerzos de confinamiento el MR en humedecimiento es mayor al MR en secado; por otra parte, con esfuerzos de confinamientos mayores a 250 kPa se mantiene la lógica de MR en secado mayor al MR en humedecimiento.

- MGM 2 (18% contenido de finos y 12% de IP)

A partir de los resultados obtenidos de la Figura 19 se observa que el MR en secado y humedecimiento es mayor que el MR en condiciones iniciales; también se evidencia que existe un efecto positivo de la succión ya que, al disminuir la humedad, aumentó el MR.

Para esfuerzos de confinamiento bajos entre 80 kPa y 270 kPa aproximadamente, el MR en humedecimiento es mayor al MR en secado. Lo anterior puede estar asociado a que la variación en el contenido de humedad entre el humedecimiento y secado es muy baja (1 punto porcentual) de manera que no se diferencia claramente el efecto transitorio de succión.

Comparando los valores de rigidez entre el material de control SBG-38 y los resultados obtenidos por el material MGM 2 (18% contenido de finos y 12% de IP) en condiciones iniciales, se observa que el MR del material de control SBG-38 es mayor al MR del material MGM 2 en un porcentaje promedio de 25% con diferencia marcada en esfuerzos de confinamiento bajos, en el rango entre 80 kPa y 150 kPa.

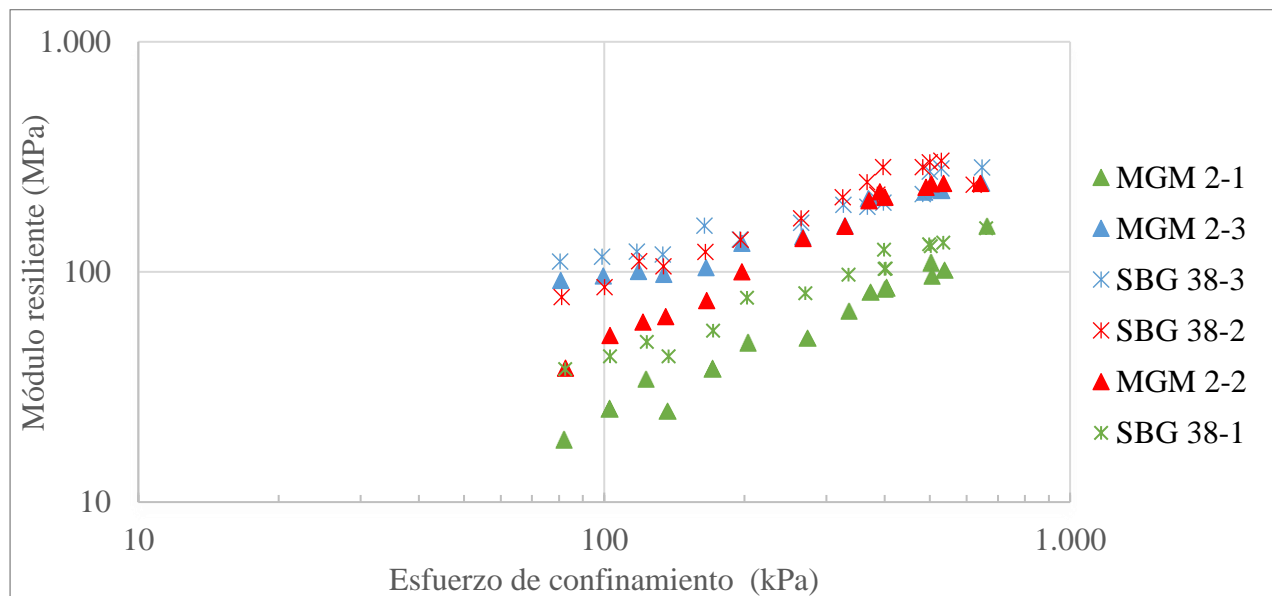
En condiciones de secado, se comporta igual que en el estado inicial, el MR del material de control SBG-38 es mayor al MR del material MGM 2 con un efecto más notorio a bajos esfuerzos de confinamiento, entre 80 kPa y 250 kPa.

En condiciones de trayectoria de humedecimiento se observa una tendencia similar en MR, donde la rigidez del material de control SBG-38 es ligeramente mayor a la del material MGM 2.

En los dos materiales se evidencia un valor máximo de rigidez después del estado de secado del ciclo.

### Figura 19

*Módulo resiliente del material MGM 2 a lo largo del ciclo de secado-humedecimiento*



- MGM 3 (18% contenido de finos y 15% de IP)

A partir de los resultados mostrados en la Figura 20 se observa que para el material MGM 3, el MR en condiciones iniciales es ligeramente mayor al MR en secado y, las curvas de respuesta poseen una tendencia similar.

Se observa que el MR en secado y el MR en condiciones iniciales es mayor que el MR en humedecimiento.

Comparando los valores de rigidez entre el material de control SBG-38 y los resultados obtenidos por el material MGM 3 (18% contenido de finos y 15% de IP) en condiciones iniciales, se observa que el MR del material MGM 3 es mayor al MR del material de control SBG-38 en un porcentaje promedio de 107% con diferencia marcada en esfuerzos de confinamiento bajos (i.e., entre 80 kPa y 200 kPa).

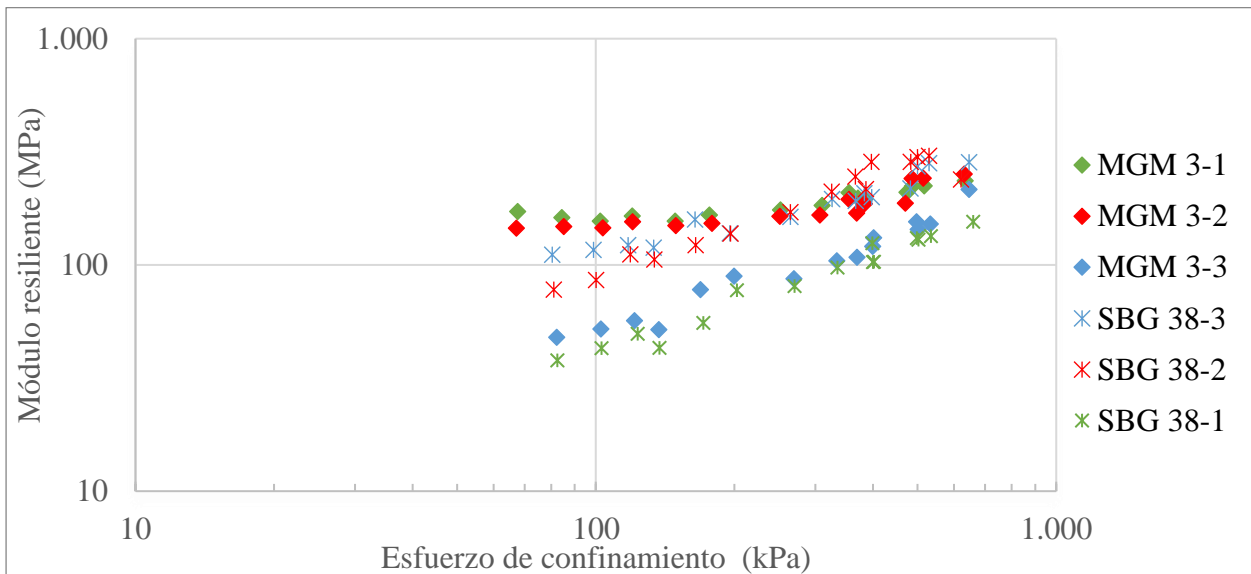
En condiciones de secado, el MR del material de control SBG-38 es mayor al MR del material MGM 3 con un efecto más notorio a bajos esfuerzos de confinamiento, entre 80 kPa y 150 kPa.

En condiciones de trayectoria de humedecimiento se observa que el MR del material de control SBG-38 es mayor al MR del material MGM 3 con diferencias notorias a bajos esfuerzos de confinamiento, entre 80 kPa y 150 kPa.

En el material de control SBG-38 se evidencia un valor máximo de rigidez después del estado de secado del ciclo, mientras que en el material MGM 3 se presenta en el estado inicial del ciclo (evaluación después de compactación).

**Figura 20**

*Módulo resiliente del material MGM 3 a lo largo del ciclo de secado-humedecimiento*



- MGM 7 (24% contenido de finos y 8% de IP)

A partir de los resultados mostrados en la Figura 21 se observa que el MR en secado es mayor al MR en condiciones iniciales. Sin embargo, para bajos esfuerzos de confinamiento (entre 80 kPa y 135 kPa) el MR en condiciones iniciales es mayor al MR en secado.

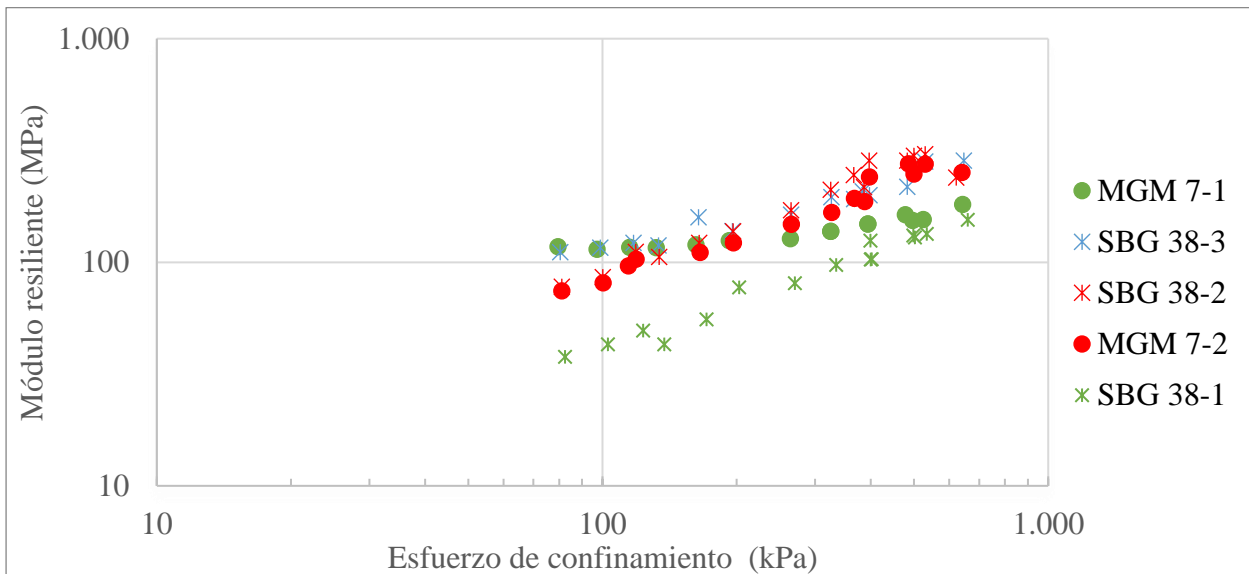
Comparando los valores de rigidez entre el material de control SBG-38 y los resultados obtenidos por el material MGM 7 (24% contenido de finos y 8% de IP) en condiciones iniciales, se observa que el MR del material MGM 7 es mayor al MR del material de control SBG-38 en un porcentaje promedio de 51% con diferencia marcada en esfuerzos de confinamiento bajos (entre 80 kPa y 150 kPa).

En condiciones de secado, el MR del material de control SBG-38 es ligeramente mayor al MR del material MGM 7, y las curvas de respuesta poseen una tendencia similar.

En los dos materiales se evidencia un valor máximo de rigidez después del estado de secado.

**Figura 21**

*Módulo resiliente del material MGM 7 a lo largo del ciclo de secado-humedecimiento*



- MGM 8 (24% contenido de finos y 12% de IP)

A partir de los resultados reportados en la Figura 22 se observa que el MR en secado es mayor al MR en condiciones iniciales.

Se observa que el MR en secado es mayor al MR en humedecimiento con diferencias marcadas a bajos esfuerzos de confinamiento (entre 80 kPa y 180 kPa).

El MR en humedecimiento es mayor al MR en condiciones iniciales, sin embargo, a bajos esfuerzos de confinamiento entre 80 kPa y 105 kPa, el MR en condiciones iniciales es mayor al MR en humedecimiento.

Comparando los valores de rigidez entre el material de control SBG-38 y los resultados obtenidos por el material MGM 8 (24% contenido de finos y 12% de IP) en condiciones iniciales, se observa que el MR del material MGM 8 es mayor al MR del material de control SBG-38 en un porcentaje promedio de 10%, con curvas de respuesta de tendencia similar.

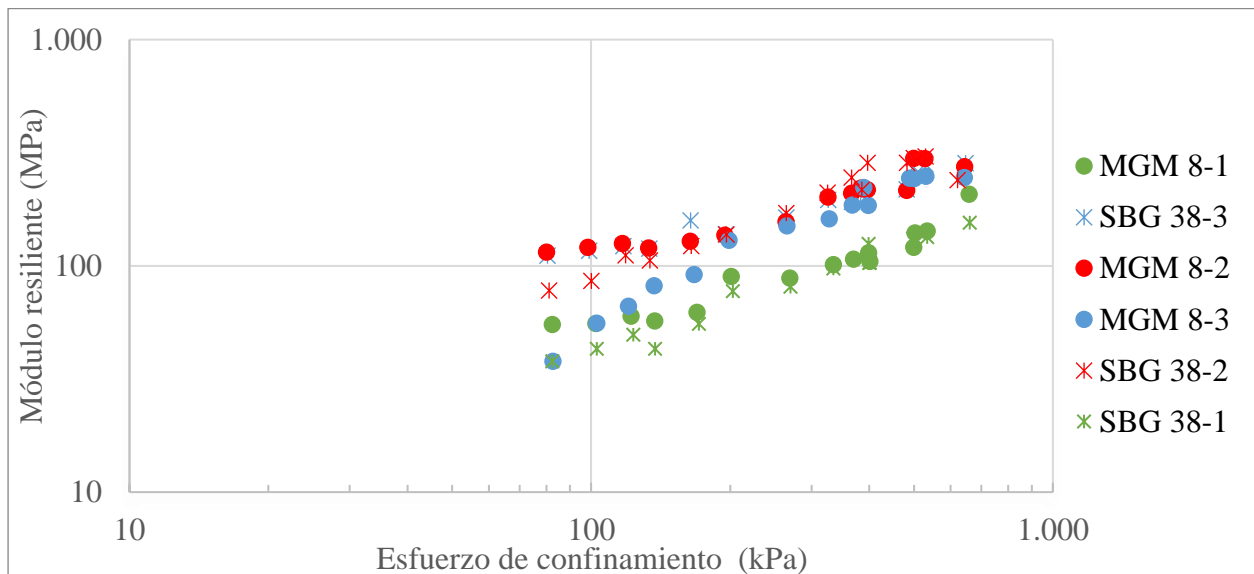
En condiciones de secado, el MR del material de control SBG-38 es ligeramente mayor al MR del material MGM 8; sin embargo, a bajos esfuerzos de confinamiento, entre 80 kPa y 135 kPa, el MR del material MGM 8 es mayor al MR del material de control SBG-38.

En condiciones de trayectoria de humedecimiento se observa que el MR del material de control SBG-38 es mayor al MR del material MGM 8 con diferencias notorias a bajos esfuerzos de confinamiento, entre 80 kPa y 150 kPa.

En los dos materiales se evidencia un valor máximo de rigidez después del estado de secado del ciclo.

**Figura 22**

*Módulo resiliente del material MGM 8 a lo largo del ciclo de secado-humedecimiento*



En la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.** se presentan los valores de módulo resiliente (MR) promedio medidos en cada fase de saturación: condición inicial, trayectoria en secado y trayectoria en humedecimiento para cada MGM representando el ciclo de secado-humedecimiento.

**Tabla 17***Valores promedio de módulo resiliente en el ciclo secado-humedecimiento de cada MGM*

MGM	Contenido de finos (%)	IP (%)	FASE		Humedad (%)	MR (MPa)
SBG-38	8,5	0	Condición inicial	SBG 38-1	11,17	91,00
			Trayectoria secado	SBG 38-2	9,01	193,14
			Trayectoria humedecimiento	SBG 38-3	9,56	185,37
MGM 1	18	8	Condición inicial	MGM 1-1	11,28	62,45
			Trayectoria secado	MGM 1-2	8,73	141,00
			Trayectoria humedecimiento	MGM 1-3	9,33	112,37
MGM 2	18	12	Condición inicial	MGM 2-1	12,04	68,34
			Trayectoria secado	MGM 2-2	9,45	172,95
			Trayectoria humedecimiento	MGM 2-3	10,26	165,01
MGM 3	18	15	Condición inicial	MGM 3-1	11,7	188,60
			Trayectoria secado	MGM 3-2	9,98	179,99
			Trayectoria humedecimiento	MGM 3-3	10,53	106,27
MGM 7	24	8	Condición inicial	MGM 7-1	12,33	137,53
			Trayectoria secado	MGM 7-2	10,29	171,55
MGM 8	24	12	Condición inicial	MGM 8-1	11,5	100,28
			Trayectoria secado	MGM 8-2	9,1	189,17
			Trayectoria humedecimiento	MGM 8-3	9,76	156,52

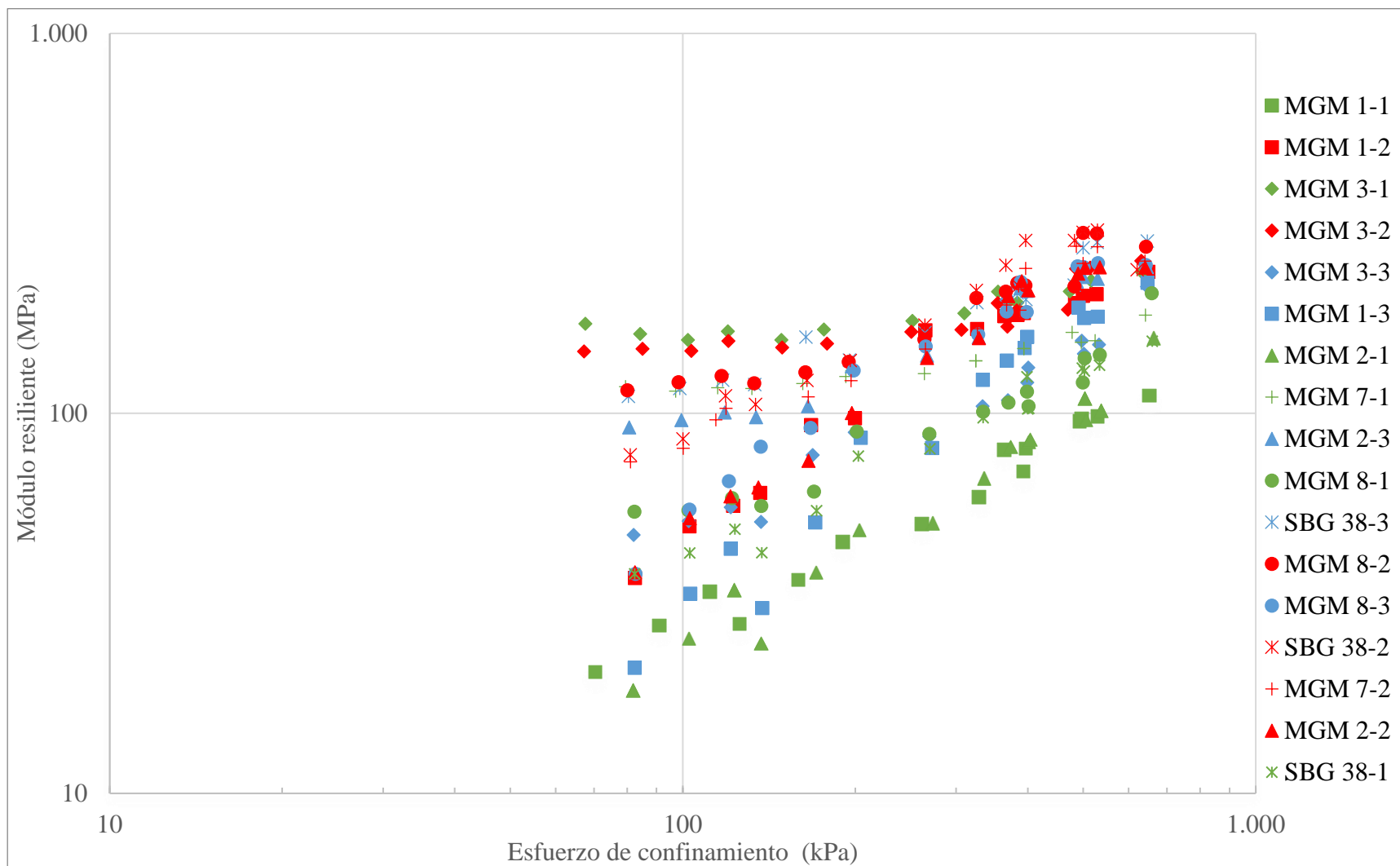
Se observa en general que el MR medido en el estado inicial del ciclo (después de compactar la probeta) presenta los menores valores de rigidez de todo el ciclo. En el estado de secado del ciclo, donde se contó con -2 puntos porcentuales de humedad respecto a la humedad óptima, se observa que se presentan los mayores valores de rigidez de todo el ciclo. Finalmente, al final del ciclo donde se realizó el humedecimiento (+1 punto porcentual de humedad), se observa que los valores de rigidez disminuyen hasta un valor intermedio entre el estado inicial y el de secado. Para el material MGM 3, se observó que el comportamiento anteriormente

mencionado varía; el valor máximo de rigidez se presenta en el estado inicial del ciclo y el valor mínimo al final del ciclo (humedecimiento), ver Figura 24.

En la Figura 23 se observa el comportamiento de la rigidez en cada una de las secuencias de cada MGM. Se evidencia una tendencia creciente lineal de la rigidez en general para todos los materiales en función del esfuerzo de confinamiento. El material de control SBG-38 se encuentra ligeramente por encima del nivel promedio de los MGMs. También se observa que durante el ciclo de secado-humedecimiento, a medida que los materiales pierden humedad su rigidez aumenta considerablemente. En condición inicial (después de compactación) se observa que para un contenido de finos de 18% (MGM 1, 2, y 3) se aumenta el MR al aumentar el IP y para un contenido de finos de 24% (MGM 7 y 8) al aumentar el IP se disminuye el MR. En esta condición inicial se tiene que el MR del material de control SBG-38 es mayor al MR de los materiales MGM 1 y 2 y el MR del material de control SBG-38 es menor al MR del material MGM 3 para contenido de finos de 18%. El MR del material de control SBG-38 es menor que el MR de los materiales MGM 7, 8 para contenido de finos de 24%.

**Figura 23**

*Comportamiento de rigidez a lo largo de las 15 secuencias de cada MGM*



En condición de secado se evidencia que tanto para un contenido de finos de 18% como de 24% al aumentar el IP aumenta el MR. Así mismo, para los dos contenidos de finos previamente mencionados se tiene que el MR del material de control SBG-38 es mayor que el MR de los materiales MGM 1, 2, 3, 7, y 8 en secado.

En condición de humedecimiento se evidencia que para un contenido de finos de 18% se presenta un valor máximo de MR con un IP de 12%. Así mismo, se tiene que el MR del material de control SBG-38 es mayor al MR de los materiales MGM 1, 2, 3 y 8 en trayectoria de humedecimiento.

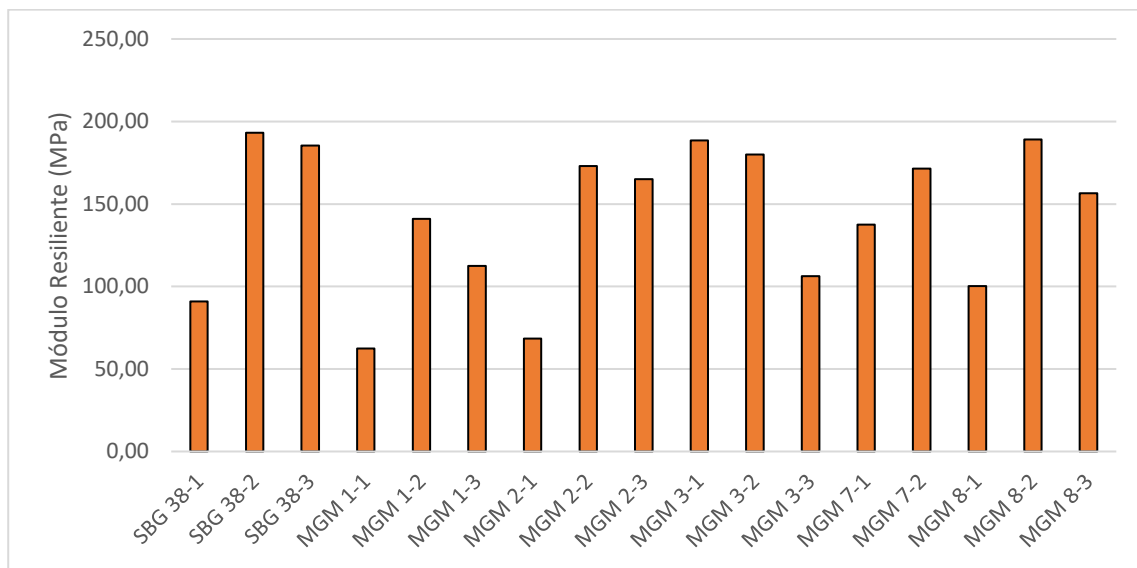
De acuerdo con la Figura 24, los materiales con contenido de finos de 18% (MGM 1, 2 y 3, con IP de 8, 12 y 15% respectivamente), se puede inferir que para un IP de 12%, la rigidez aumenta respecto a un IP de 8% para el mismo contenido de finos. Para un IP de 15% (MGM 3) al final del ciclo de secado-humedecimiento, la rigidez disminuye. Por lo tanto, en condiciones iniciales, secado y trayectoria de humedecimiento, a medida que se aumenta el IP para los MGM con contenido de finos de 18%, el MR aumenta con excepción del material MGM 3 el cual disminuye su MR en trayectoria de humedecimiento respecto al material MGM 2.

A partir de los datos presentados en la Figura 24 se concluye que para los materiales con contenido de finos de 24% (MGM 7 y 8, con IP de 8 y 12% respectivamente), para un IP de 12%, la rigidez disminuye respecto a un IP del 8% en el estado inicial del ciclo (as compacted). En condición de secado, la rigidez aumenta para un IP de 12% respecto a un IP de 8%. Para un mismo IP de 8% (MGM 1 y 7) se evidencia que aumenta el MR en condición inicial, secado, y trayectoria de humedecimiento al aumentar el contenido de finos. Para un IP de 12% (MGM 2 y 8) se evidencia que el MR aumenta en condición inicial y secado a medida

que se aumenta el contenido de finos; en trayectoria de humedecimiento el MR disminuye al aumentar el contenido de finos. Respecto al contenido de finos, se evidenció que la rigidez de los materiales con 24% de contenido de finos para todo el ciclo de secado-humedecimiento aumentó respecto a los materiales con 18% de contenido de finos.

**Figura 24**

*Rigidez en ciclo de secado-humedecimiento de cada MGM*



## 6.1 Estimación de la Succión Total

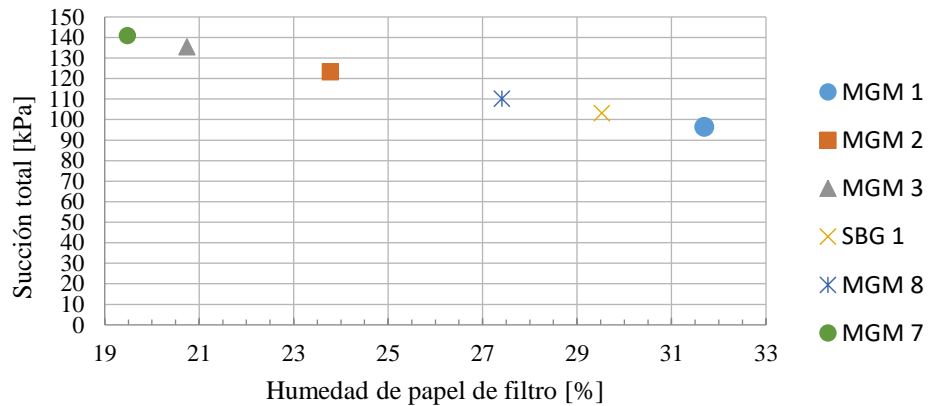
### 6.1.1 Succión post-secado

Se realizó medición de succión post-secado mediante la técnica del papel filtro definida por INVIAS (E-159 INVIAS, 2013) con el fin estimar la succión de los MGM en el estado de secado durante el ciclo de secado-humedecimiento.

Según los datos presentados en la Figura 25 se evidencia que el material MGM 7 presentó la mayor succión 140.93 kPa (36% más que la probeta SBG-38 de control) con una humedad de papel filtro de 19.48% y una humedad de probeta Wd de 10.29%. El material MGM 1 presentó la menor succión 96.41 kPa (7% menos que la probeta SBG-38 de control) con una humedad de papel filtro de 31.69% y una humedad de probeta Wd de 8.73%.

**Figura 25**

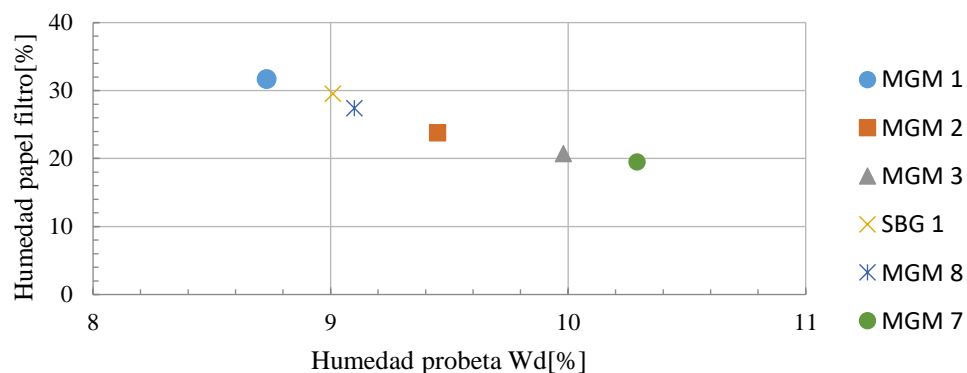
*Curva de retención de humedad post-secado de los MGM*



A partir de los datos presentados en la Figura 26, se observa que la probeta MGM 1 presenta la menor humedad  $W_d$  (después de secado) y a la vez la mayor humedad de papel filtro respecto a los demás materiales, esto conlleva a un índice bajo de succión. Por el contrario, la probeta MGM 7 tiene la mayor humedad  $W_d$  y a la vez la menor humedad de papel filtro respecto a los demás materiales, presentando mejor capacidad de retención de agua lo que conlleva a un índice alto de succión.

**Figura 26**

*Humedad del suelo (%) vs humedad del papel filtro (%) post-secado*

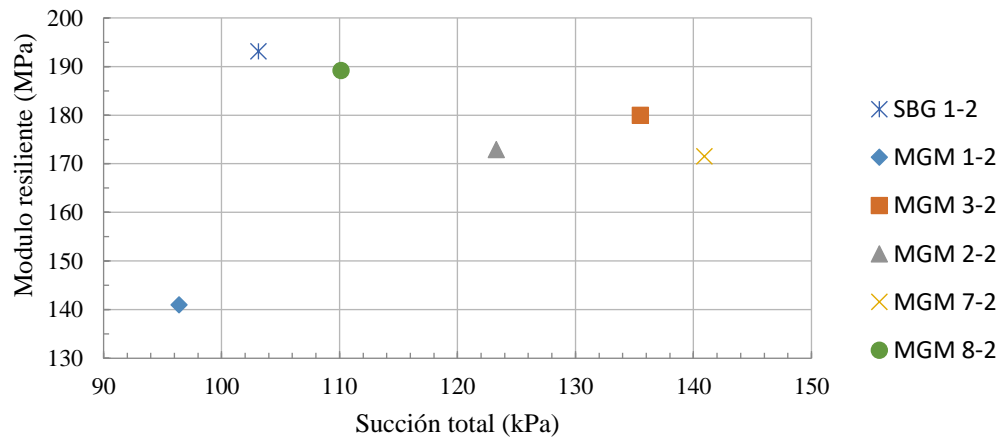


En la Figura 27 se observa que el material MGM 8 en su condición de trayectoria de secado en condición transitoria se comporta similar al material SBG-38 de control y el material

MGM 1 en trayectoria de secado en condición transitoria es el más deficiente respecto a los demás materiales.

### Figura 27

*Relación entre modulo resiliente y succión total en trayectoria de secado en condición transitoria*



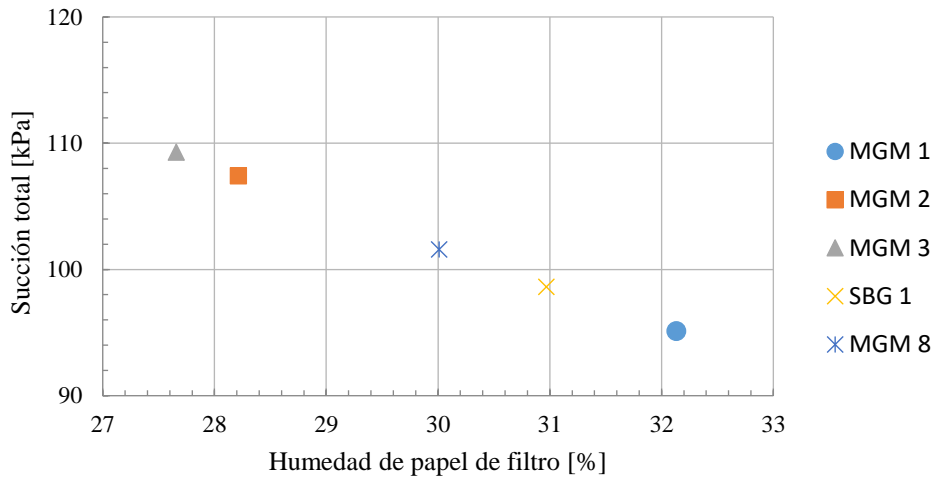
#### 6.1.2 Succión post-humedecimiento

Se realizó medición de succión post-humedecimiento mediante la técnica del papel filtro definida por INVIAS (E-159 INVIAS, 2013) con el fin estimar la succión de los MGM en el estado de trayectoria de humedecimiento en el ciclo de secado-humedecimiento.

Según la información presentada en la Figura 28, se evidencia que el material MGM 3 presentó la mayor succión 109.30 kPa con una humedad de papel filtro de 27.66% y una humedad de probeta  $W_w$  de 10.53%. El material MGM 1 presentó la menor succión 95.11 kPa con una humedad de papel filtro de 32.13% y una humedad de probeta  $W_w$  de 9.33%.

**Figura 28**

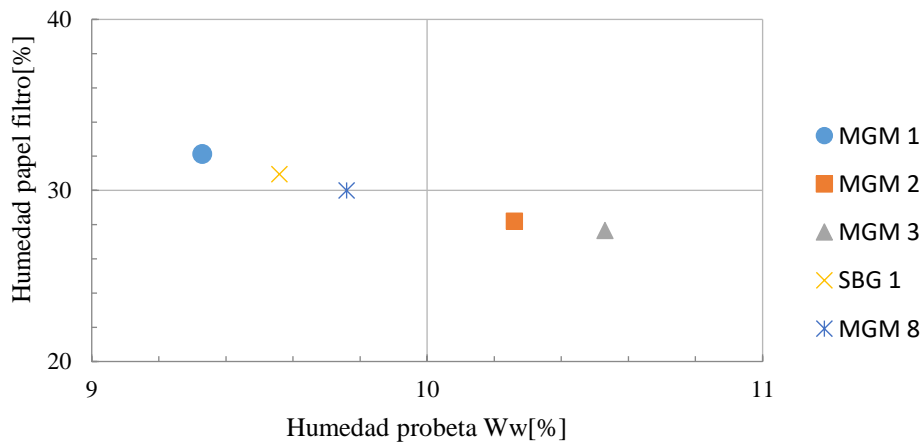
*Curva de retención de humedad post-humedecimiento de los MGM*



A partir de los datos presentados en la Figura 29, se observa que la probeta MGM 1 presenta la menor humedad  $W_w$  (después de humedecimiento) y a la vez la mayor humedad de papel filtro respecto a los demás materiales, esto conlleva a un índice bajo de succión. Por el contrario, la probeta MGM 3 tiene la mayor humedad  $W_w$  y a la vez la menor humedad de papel filtro respecto a los demás materiales, presentando mejor capacidad de retención de agua lo que conlleva a un índice alto de succión.

**Figura 29**

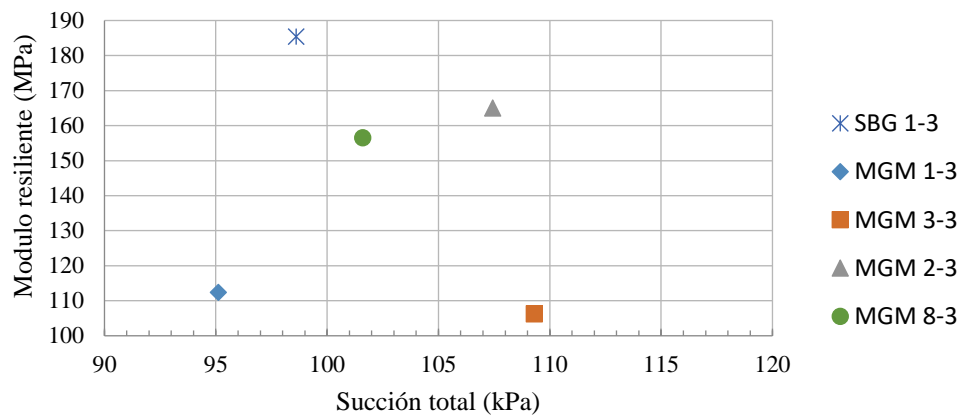
*Humedad del suelo (%) vs humedad del papel filtro (%) post-humedecimiento*



En la Figura 30 se observa que el material MGM 8 en su condición de trayectoria de humedecimiento en condición transitoria es el que más se acerca al comportamiento del material SBG-38 de control y el material MGM 3 en trayectoria de humedecimiento es el más deficiente.

### Figura 30

*Relación entre modulo resiliente y succión total en trayectoria de humedecimiento en condición transitoria*



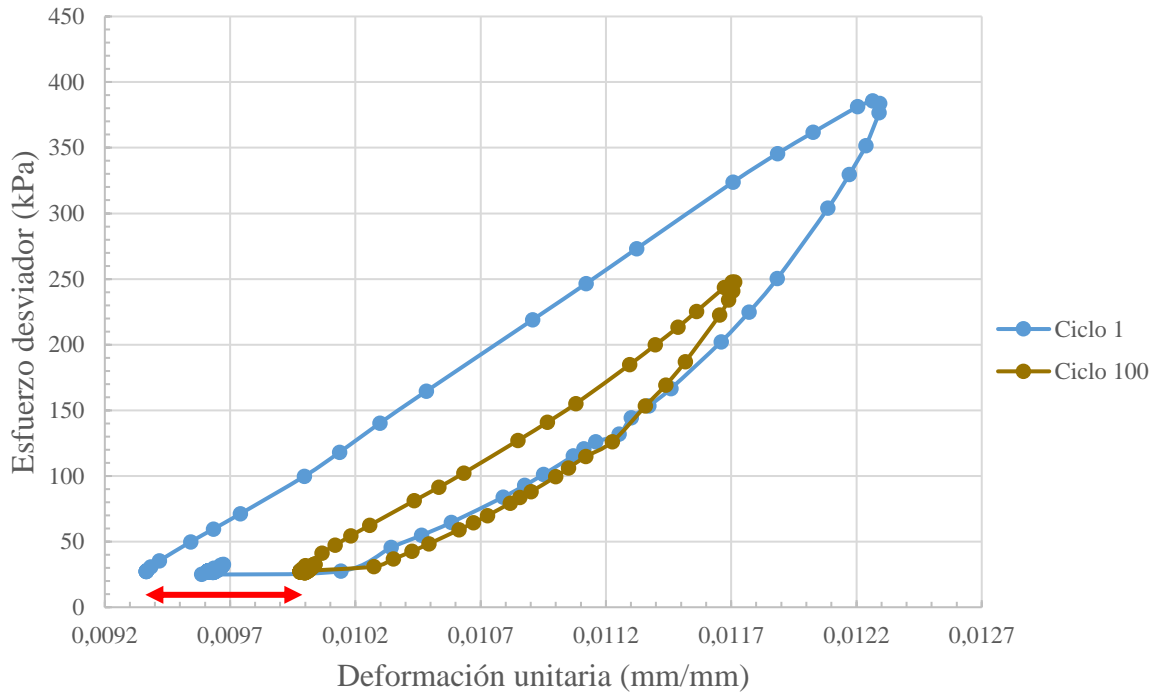
Nota: La medición de succión para la probeta MGM 7 post-humedecimiento no fue posible llevarse a cabo debido a cambios en el protocolo de humedecimiento.

### 6.2 Deformación plástica

Para el cálculo de deformación plástica, es necesario contemplar los 100 ciclos de carga contenidos en cada una de las 15 secuencias de carga que abarca el ensayo triaxial dinámico. La deformación plástica es la diferencia entre el primer valor de deformación unitaria del ciclo 1 y el último valor del ciclo 100 como se muestra en la Figura 31.

**Figura 31**

*Ciclos de carga y descarga para cálculo del módulo resiliente*



En la Tabla 18 se encuentran las deformaciones plásticas calculadas a partir de cada uno de los tres ensayos triaxiales incluido el ciclo de secado-humedecimiento. Para cada ensayo se reporta la deformación plástica después de aplicar 15 secuencias de carga (1500 ciclos de carga) más 500 ciclos de carga de acondicionamiento.

**Tabla 18**

*Deformación plástica para cada MGM durante el ciclo de secado-humedecimiento*

MGM	Contenido de finos (%)	IP (%)	FASE	Humedad (%)	Def. plástica (mm)	
SBG-38	8,5	0	Condición inicial	SBG 38-1	11,17	0,00531
			Trayectoria secado	SBG 38-2	9,01	0,00240
			Trayectoria humedecimiento	SBG 38-3	9,56	0,00173
MGM 1	18	8	Condición inicial	MGM 1-1	11,28	0,01726
			Trayectoria secado	MGM 1-2	8,73	0,00396

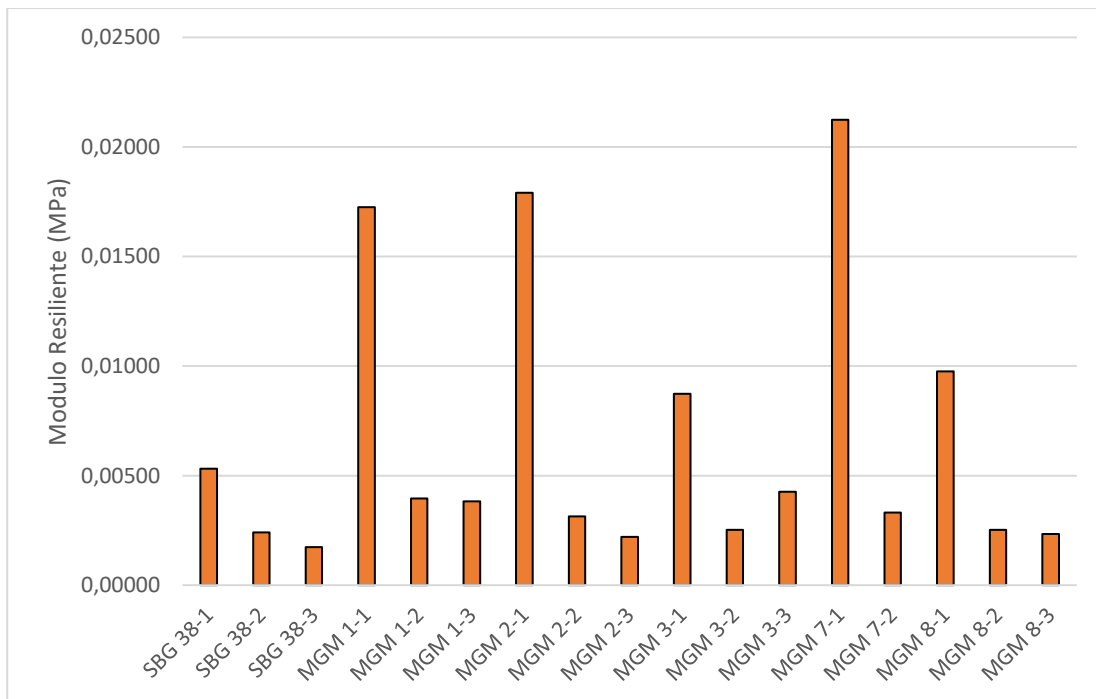
			Trayectoria humedecimiento	MGM 1-3	9,33	0,00383
			Condición inicial	MGM 2-1	12,04	0,01790
MGM 2	18	12	Trayectoria secado	MGM 2-2	9,45	0,00313
			Trayectoria humedecimiento	MGM 2-3	10,26	0,00220
			Condición inicial	MGM 3-1	11,7	0,00873
MGM 3	18	15	Trayectoria secado	MGM 3-2	9,98	0,00253
			Trayectoria humedecimiento	MGM 3-3	10,53	0,00426
MGM 7	24	8	Condición inicial	MGM 7-1	12,33	0,02124
			Trayectoria secado	MGM 7-2	10,29	0,00331
			Condición inicial	MGM 8-1	11,5	0,00976
MGM 8	24	12	Trayectoria secado	MGM 8-2	9,1	0,00252
			Trayectoria humedecimiento	MGM 8-3	9,76	0,00234

Según los datos mostrados en la Figura 32, se presentan magnitudes diferentes de deformación plástica en cada estado de saturación de los MGMs. Existe una tendencia de deformación plástica de mayor magnitud en la condición inicial del ciclo de secado-humedecimiento (evaluación después de compactación) y un aumento de deformación plástica a mayor contenido de finos en esta condición. En las probetas MGM 1-1, MGM 2-1 y MGM 7-1, se presenta un aumento de 254% en la deformación plástica respecto a la probeta SBG-38 (material de control), mientras que las probetas MGM 3-1 y MGM 8-1 presentan un aumento de 74% únicamente. Se evidencia que la probeta MGM 7-1 mostró la mayor deformación plástica de las muestras seguida por la MGM 2-1, mientras la probeta MGM 3-1 evidenció la menor deformación plástica sin tener en cuenta la SBG-38 de control. Adicionalmente, se observa una disminución de la deformación plástica a medida que se realiza el ciclo de secado-humedecimiento a excepción de la probeta MGM 3 (18% contenido de finos y 15% de IP).

Con base en los resultados anteriores se puede asociar los mayores valores de deformación plástica que tienen las probetas en su condición inicial con el grado de saturación que poseen y a su vez el MR es el más bajo en esta condición, por lo que puede elevar los valores de deformación permanente.

**Figura 32**

*Deformación plástica para cada MGM durante el ciclo de secado-humedecimiento*



## 7 Conclusiones

Con base en la revisión de literatura realizada, se puede concluir que los materiales considerados inadecuados a la luz de las especificaciones INVIAS para subbases granulares (en cuanto a contenido de finos e índices de plasticidad), son considerados adecuados por otras especificaciones de calidad de agencias viales como el Manual de Carreteras de Chile, FHWA y TxDOT. Esto conlleva a generar una limitación al país, en cuanto a factores económicos, por las exigencias que establece el INVIAS para el uso de materiales granulares en estructuras de pavimento, especialmente para el caso de vías de bajo volumen de tránsito (o vías terciarias).

Con respecto a rigidez, los materiales que más se acercan—durante el ciclo de secado-humedecimiento—a las propiedades del material de control (SBG-38) son el MGM 3 (18% contenido de finos y 15% de IP) y el MGM 7 (24% contenido de finos y 8% de IP). En el ciclo de secado-humedecimiento, en el estado de secado del ciclo se obtiene la mayor rigidez. Esto es debido a la disminución de humedad en el material, que conlleva a incrementos de succión.

Los MGM a nivel general obtuvieron valores de rigidez aceptables. Sin embargo, se sugiere emplear otro tipo de material base (material de cantera) con el objetivo de evaluar y comparar el comportamiento en términos de rigidez, succión, y deformación permanente.

Adicionalmente, a partir del proceso en la trayectoria de humedecimiento en condición transitoria, se evidenció que para garantizar la ganancia de humedad del MGM en el box hermético es necesario realizar el aislamiento de al menos 15 días.

Como conclusión de la medición de succión, se definió que el material de estudio que presentó un mayor valor de succión total es el material MGM 7 (24% contenido de finos y 8% de IP). Por lo tanto, este es el material que posee mayor capacidad de retención de agua entre los MGMs estudiados. Por el contrario, el material que presentó el menor valor de succión es

el MGM 1 (18% contenido de finos y 8% de IP), el cual a su vez presentó el menor valor de rigidez respecto al material de control SBG-38 (8.5% contenido de finos y 0% de IP).

Respecto a la deformación plástica, se concluye que se presenta un pico máximo en la condición inicial del ciclo de secado-humedecimiento donde se evalúa el material a la humedad óptima de compactación; la máxima deformación plástica se presenta en la condición inicial del material MGM 7 (24% contenido de finos y 8% de IP) (MGM 7-1).

Finalmente, las humedades medidas (sobre el material sobrante de la masa empleada en el proceso de compactación) de cada MGM presentan una variación de 0.5% con respecto a la humedad—objetivo—óptima de compactación. Por lo tanto, es de especial cuidado realizar correctamente el proceso de mezclado y empaquetado para así compactar una vez se haya cumplido el tiempo de curado.

## **8 Recomendaciones**

Para próximas investigaciones en el tema se recomienda:

- Ampliar los estados de saturación en el ciclo de secado-humedecimiento con el fin de evaluar el comportamiento de los MGMs y determinar una tendencia. Adicionalmente, Se recomienda extender el tiempo en trayectoria de humedecimiento y aislar totalmente las probetas garantizando hermeticidad. De esta forma se espera mejorar el protocolo del ciclo secado-humedecimiento.
- Evaluar un material de mejor calidad de otra cantera adecuando a las mismas características y comparar resultados con el fin de evaluar la variabilidad de las propiedades mecánicas y direccionar la investigación.
- Mejorar las condiciones de aislamiento para las probetas empleadas en el ensayo de succión, garantizando que los recipientes en los que se almacenan permanezcan bien sellados para evitar variación en la humedad.

## 9 Referencias Bibliográficas

- AASHTO. (2021). *Norma de Ensayo AASHTO T 307 americana triaxial dinamico.pdf*.
- Barrera-Bucio, M., & Garnica-Anguas, P. (2002). Introducción a la mecánica de suelos no saturados en vías terrestres. *Publicación Técnica*, 198, 143.  
<http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt198.pdf>
- Bicalho, K., Correia, A., & Ferreira, S. (2007). Filter paper method of soil suction measurement. *XIII Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, July*, 4–7.  
<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/12305>
- Cáceres, O. (2021). *ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA MONOTÓNICA EN MATERIALES GRANULARES MARGINALES COMO ALTERNATIVA EN LA CONSTRUCCIÓN DE VÍAS ANDRÉS*.
- CONPES 4039. (2021). *Inversión del programa vías para la conexión de territorios, el crecimiento sostenible y la reactivación*.
- Corley, M. (2021). *Characterization of Bases and Subbases for AASHTO ME Pavement Design FINAL REPORT*.
- E-159 INVIAS. (2013). *E-159 Instituto Nacional de Vías*.
- Federal Lands Highway. (2022). STANDARD SPECIFICATIONS FOR CONSTRUCTION OF ROADS AND BRIDGES ON FEDERAL HIGHWAY PROJECTS. *Federal Register*, 43(199), 47182–47184.
- Fernanda, M., Oscar, R., & Javier, C. (2007). Ensayo De Compactación Giratoria En Suelos Como Alternativa Al Ensayo De Compactación Proctor Gyrotory Compaction Test in Soils As Alternative To the Proctor Compaction Test. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 17, 67–81.
- Figueroa, A. (2008). *COMPLEMENTACIÓN, AJUSTE Y CALIBRACIÓN PARA LA PUESTA EN MARCHA DEL EQUIPO TRIAXIAL CÍCLICO CON SUCCIÓN CONTROLADA PARA GRANULARES EN LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES*.
- Francisco, R., & Tuco, G. (2010). *DETERMINACIÓN DEL MÓ DULO RESILIENTE DE DULO RESILIENTE DE SUELOS GRANULARES ME DIANTE ENSAYOS DIANTE ENSAYOS TRIAXIALES DINÁMICOS*.
- García-Ochoa, José., Quitp-Rodríguez, Juan., & Perdomo Moreno, J. A. (2020). Análisis de la huella de carbono en la construcción y su impacto sobre el ambiente. *Villavicencio: Universidad Cooperativa de Colombia*, 22. <http://hdl.handle.net/20.500.12494/16031>
- Gelves, R. (2022). *Evaluación exploratoria de la caracterización mecánica e hidráulica de un material granular marginal a emplear en estructuras de pavimento (Issue 8.5.2017)*. Universidad Industrial de Santander.

- INVIAS. (2013). Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos INV E 126 - 13. *Límite Plástico e Índice de Plasticidad de Los Suelos*, 1–20.
- INVIAS. (2022). Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras*, 1–440.
- Martínez Chinchilla, J. J., & Vargas Prada, J. C. (2022). *Evaluación del Comportamiento Hidromecánico de Materiales Granulares Marginales de Subbase Identificados como MGM-1. 8.5.2017*, 2003–2005.
- Martínez, D. (2013). Revisión de los coeficientes de equivalencia de los espesores de la NC 334:2004 mediante la modelación computacional. *Tesis de Grado*.
- Meza, V. (2012). SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS, DE LA INVESTIGACIÓN A LA CÁTEDRA UNIVERSITARIA. *SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS, DE LA INVESTIGACIÓN A LA CÁTEDRA UNIVERSITARIA*.  
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/31251/43362>
- Ministerio de Obras Públicas. (2022). *ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERALES DE CONSTRUCCIÓN*.
- Ministerio de transportes y comunicaciones. (2013). ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERALES PARA LA CONSTRUCCIÓN EG-2013. *Suelos, Geología, Geotecnia Y Pavimentos*, 0(0), 1440. [https://cdn-web.construccion.org/normas/files/tecnicas/Manual\\_Suelos\\_Pavimentos.pdf](https://cdn-web.construccion.org/normas/files/tecnicas/Manual_Suelos_Pavimentos.pdf)
- Ministerio Fomento. (2001). *Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes*.
- Royero, J., & Clavijo, J. (2001). Mapa Geológico Generalizado Departamento de Santander. *Ingeominas*, 256.
- SGC. (2001). *ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA DE ALGUNAS LADERAS DE LOS MUNICIPIOS DE BUCARAMANGA, FLORIDABLANCA, GIRÓN Y PIEDECUESTA*.
- Texas Department of Transportation. (2022). Roadway Design Manual. *Roadway Design Manual, Enero*, 311.
- Transit New Zealand. (1986). *SUBBASE AGGREGATE SPECIFICATION TNZ M/3*. 1–12.