

	1. FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN 2. PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPECIAL DE REHABILITACIÓN Y MANTENIMIENTO VIAL

Informe Final

Evaluar el empleo de diferentes materiales que funcionen como bases no erodables para la conservación del espacio público competencia de la Unidad Administrativa Especial de Mantenimiento y Rehabilitación Vial.

Álvaro Sandoval Reyes
DIRECTOR GENERAL UAERMV

Camilo Enrique Marrugo Martínez
GERENTE DEL DESARROLLO, LA CALIDAD Y LA INNOVACIÓN

Humberto Ramírez Gómez
DIRECTOR O LÍDER DEL PROYECTO

Pedro Antonio Farieta Martínez
GENERADOR O PATROCINADOR DEL PROYECTO

BOGOTÁ D.C., JULIO DE 2024

	1. FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN 2. PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN:	5
2.	JUSTIFICACIÓN	9
2.1.	Alineación con el Plan Distrital de Desarrollo	10
2.2.	Contribución al Plan Nacional de Desarrollo:	10
2.3.	Cumplimiento de los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible):	10
3.	ALCANCE	11
4.	OBJETIVOS	11
4.1.	Objetivo General	11
4.2.	Objetivos Específicos	11
5.	MARCO TEÓRICO Y NORMATIVO	11
5.1.	Base Granular	11
5.2.	Subbase Granular para vías peatonales	11
5.3.	Erosión y erodabilidad	12
5.4.	Resistencia a la erosión	12
6.	ANTECEDENTES	12
7.	METODOLOGIA	13
7.1.	Revisión bibliográfica	13
7.2.	Granulometría	14
7.3.	Determinación de la humedad óptima	14
7.4.	Compactación de base granular	15
7.5.	Curado	15
7.6.	Compresión Simple	16
8.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	17
8.1.	Granulometría	17
8.2.	Determinación de la cantidad de material que pasa el tamiz de 75 µm (No. 200) en los agregados pétreos mediante lavado.	18
8.3.	Humedad Óptima	19
8.3.1	Base Granular Tipo B (Monte Olivo) de color amarillo	19
8.3.2	Base Granular Tipo B con 3% de cemento UG (BG-Cemento 3%)	19
8.3.3	Base Granular Tipo B con 6% de Cal Hidratada (BG-Cal 6%)	20
8.3.4	Base Granular Tipo B con 1% de Emulsión CRL-1 (100-250) (BG-Emulsión 1%)	21
8.4.	Ensayo de humedecimiento y secado	23

	1. FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN 2. PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

8.4.1	Porcentaje de Pérdidas de BG-Cemento 3%	23
8.4.2	Porcentaje de Pérdidas de BG-Cal 6%	23
8.4.3	Porcentaje de Pérdidas de BG-Emulsión 1%	24
8.5.	Ensayo de Resistencia a la Compresión Simple	25
8.5.1	Base Granular Tipo B con 3% de Cemento	26
8.5.2	Base Granular Tipo B con 6% de Cal	26
8.5.3	Base Granular Tipo B con 1% de Emulsión CRL-1	27
9.	CONCLUSIONES	28
10.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	29

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.	Granulometrías admisibles para la construcción de bases granulares.	11
Tabla 2.	Granulometrías admisibles para la construcción de bases granulares.	12
Tabla 3.	Material fino obtenido por lavado.	18
Tabla 4.	Resumen de Humedad óptima, Densidad Seca Máxima y Peso Unitario Seco Máximo.....	22
Tabla 5.	Porcentaje de Pérdidas de Base Granular Tipo B con 3% de Cemento.	23
Tabla 6.	Porcentaje de Pérdidas de Base Granular Tipo B con 6% de cal.	24
Tabla 7.	Resistencia a la compresión de la Base Granular Tipo B con 3% de Cemento.	26
Tabla 8.	Resistencia a la compresión de la Base Granular Tipo B con 6% de Cal.	26
Tabla 9.	Resistencia a la compresión de la Base Granular Tipo B con 1% de Emulsión CRL-1.	27

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.	Malla Vial de Bogotá.....	5
Figura 2.	Indicador de espacio público total por localidad.	6
Figura 3.	Probabilidad de reportar un alto bienestar como función del tiempo de visita en la última semana.	7
Figura 4.	Proceso de erosión.	8
Figura 5.	Distribución de esfuerzos de bases no tratadas y tratadas.	8
Figura 6.	Capilaridad de bases granulares no tratadas y tratadas.	9
Figura 7.	Compactación de muestra para hallar humedad óptima.	14
Figura 8.	Probetas compactadas.	15
Figura 9.	Curado de las probetas.....	16
Figura 10.	Probeta sometida a compresión.	17
Figura 11.	Granulometría de Base Granular B	18
Figura 12.	Humedad óptima de Base Granular Tipo B.	19

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. MOVILIDAD Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial	1. FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN 2. PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

Figura 13. Humedad óptima de Base Granular Tipo B con 3% de cemento.	20
Figura 14. Base Granular Tipo B con 6% de Cal.	21
Figura 15. Base Granular Tipo B con 1% de Emulsión CRL-1.	22
Figura 16. Muestra con 1% de emulsión desmoronada.	25
Figura 17. Masa de los materiales	25
Figura 18. Resistencia a la compresión a los 7 días de curado de las bases granulares mejoradas.	28

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. MOVILIDAD Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial	1. FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN 2. PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

1. INTRODUCCIÓN:

La malla vial de Bogotá tiene una extensión total de 14587,85 km-carril, de los cuales 1104,87 km-carril son vías troncales, 2696,96 km-carril son arteriales, 3218,26 km-carril son intermedias y 6295,03 km-carril son locales (UAERMV, 2024). La Figura 1 muestra el estado de la malla vial de Bogotá, en donde se aprecia que sólo 38% se encuentra en buen estado, 22% presenta un estado satisfactorio, 12% está en estado justo y 9%, 7%, 5% y 7% se encuentran en estado pobre, muy pobre, grave y fallado, respectivamente. Además, la Unidad de Mantenimiento Vial informa que la ciudad de Bogotá necesita \$10,8 billones para llevar la malla vial a buen estado (UAERMV, 2024).



Figura 1. Malla Vial de Bogotá.
Tomado de (UAERMV, 2024)

Es importante mencionar que entre las funciones de la UAERMV se encuentra la de “Ejecutar las acciones de adecuación y desarrollo de las obras necesarias para la circulación peatonal, rampas y andenes, alamedas, separadores viales, zonas peatonales, pasos peatonales seguros y tramos de ciclorrutas cuando se le requiera” (UAERMV, s/f). Dado lo anterior, es menester abordar el tema del espacio público en la ciudad de Bogotá. Según el Reporte Técnico de indicadores de espacio público 2023, el espacio público de la ciudad es equivalente al tamaño de la ciudad de Rosario, Argentina, con una extensión de 182.108.582,70 metros cuadrados, disponibles, destacando que en 2023 hubo un aumento de más de 6,8 millones de metros cuadrados de espacio público con respecto al 2021. De lo anterior, se indica que el 20% representa Espacio Público Efectivo, 50% es el espacio público de circulación conexión y el espacio público ligado a la estructura ecológica principal representa el 30% (Departamento Administrativo de la Defensoría del Espacio Público, 2023). En la Figura 2, se muestra el espacio público total de Bogotá por localidad, destacando que la localidad de Santa Fe es la que cuenta con mayor espacio público por habitante y que la localidad de Rafael Uribe Uribe es la que menos espacio público posee por habitante, seguida por la localidad de Bosa.

	1. FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN 2. PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

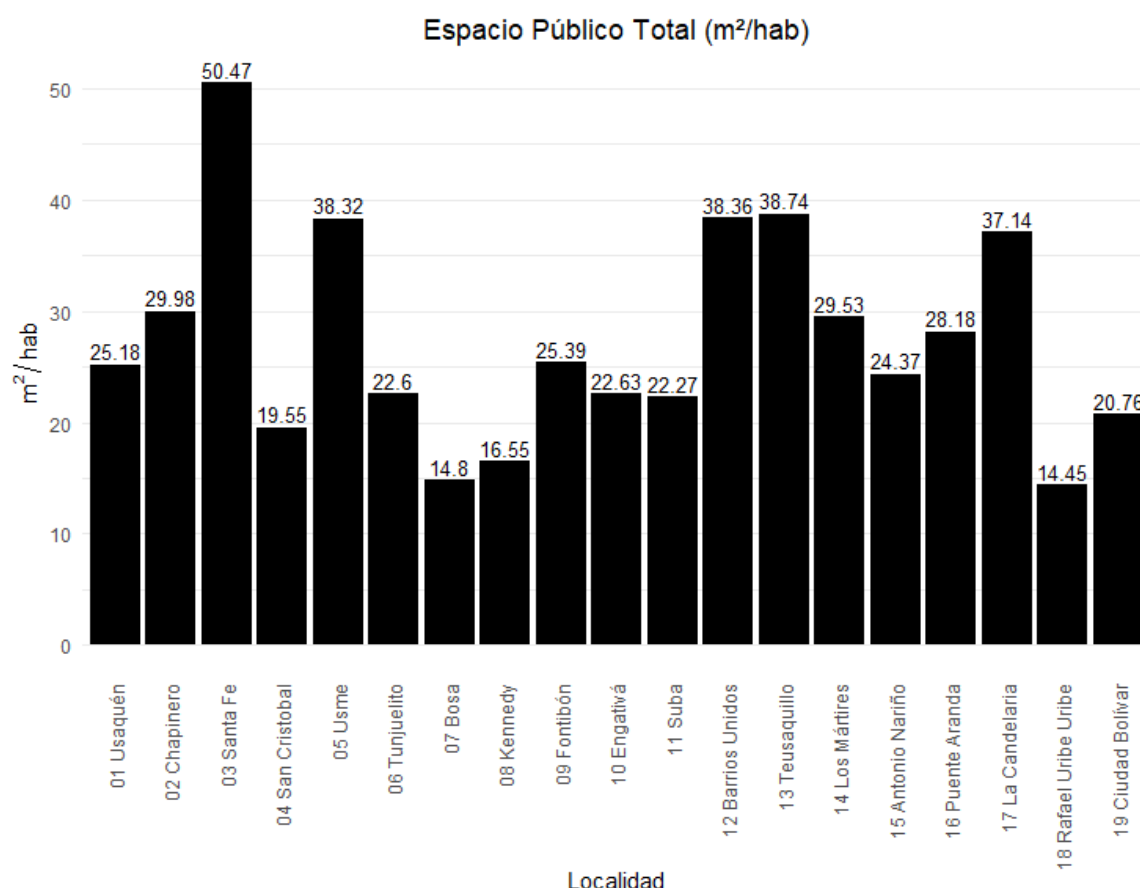


Figura 2. Indicador de espacio público total por localidad.
Adaptado de (Departamento Administrativo de la Defensoría del Espacio Público, 2023)

Es importante mencionar la relevancia del espacio público en el bienestar de las personas, un estudio realizado por investigadores de la Universidad de Exeter encontró que 120 minutos de actividad al aire libre a la semana mejora el bienestar en las personas sin que importe cómo se completaron los 120 minutos (en una sola caminata, en varias caminatas, etc.) (White et al., 2019). La Figura 3 muestra que, al alcanzar los 120 minutos, los sujetos del estudio reportaron un alto bienestar, pero que este valor de probabilidad de alto bienestar alcanzó su máximo entre los 200 y 300 minutos sin tener diferencias significativas con los 120 minutos. Vale la pena destacar que el espacio público construido por la UAERMV, generalmente es en pavimento rígido.

	1. FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	
	2. PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023		

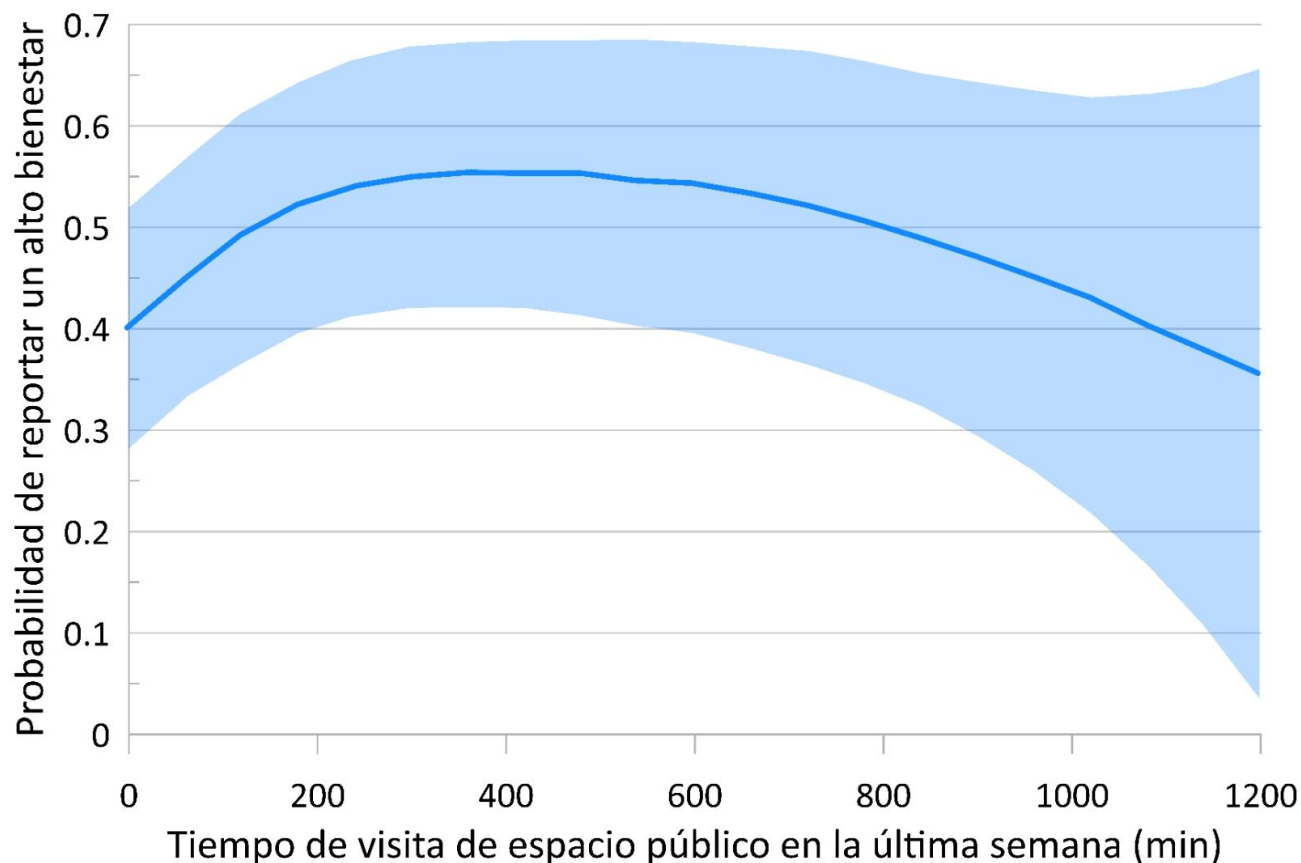


Figura 3. Probabilidad de reportar una alto bienestar como función del tiempo de visita en la última semana.

Modificado de (White et al., 2019)

Así pues, para poder realizar la construcción de un pavimento rígido o flexible se utiliza material granular para la conformación de las capas de base y subbase. La base granular puede presentar grandes deflexiones o hundimientos de más de 10 cm de profundidad debido al paso de vehículos y otros factores, como el uso de materiales erodables, compactación de mala calidad, uso de equipos inadecuados y mal control de calidad (L.E. Santaella-Valencia & Salamanca-Correo, 2002). El Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá lanzó actividades para el mejoramiento de las bases y subbases granulares, a fin de que sean menos erodables, en dichos documentos, se menciona la utilización de cemento y emulsión asfáltica (Instituto de Desarrollo Urbano, 2018a), (Instituto de Desarrollo Urbano, 2018b). Adicionalmente, la Portland Cement Association cuenta con una guía para el tratamiento de bases granulares con cemento (Halsted et al., 2006). La innovación en esta área busca optimizar el uso de recursos naturales, mejorar la sostenibilidad de las construcciones y reducir los costos de mantenimiento a lo largo del ciclo de vida de la infraestructura.

Por otro lado, los pavimentos rígidos presentan comúnmente una estructura que consta de: subrasante o terreno natural, base granular y una placa de concreto. Los daños que presentan estos pavimentos generalmente son asociados a la carga o tránsito que tiene la estructura, la humedad y la temperatura del terreno. Adicionalmente, la capa de base puede presentar daños debido a la pérdida de suelo ocasionada por un eventual lavado de finos, además de que disminuye la compactación del material. Lo anterior se conoce como erosión, algo muy común en bases y subbases granulares que son

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. MOVILIDAD Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial	1. FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN 2. PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

sometidas al agua y grandes cargas (IDU & Universidad de Los Andes, 2016). En la Figura 4, se observa el proceso que se lleva a cabo en la erosión.

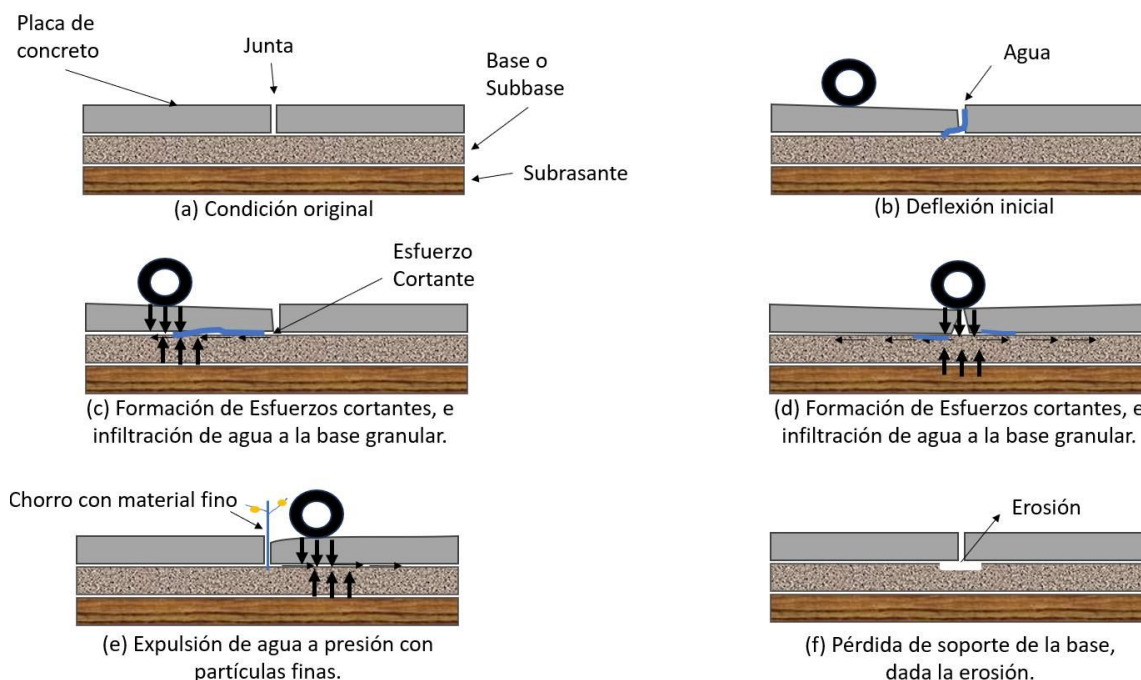


Figura 4. Proceso de erosión.
Modificado de (IDU & Universidad de Los Andes, 2016)

Al tratar las bases granulares, a fin de reducir su erodabilidad, mejora la distribución de esfuerzos y, por lo tanto, mejora la durabilidad de dicha capa del pavimento (Halsted et al., 2006). La Figura 5, muestra la distribución de esfuerzos de una base granular no tratada y una tratada con cemento.

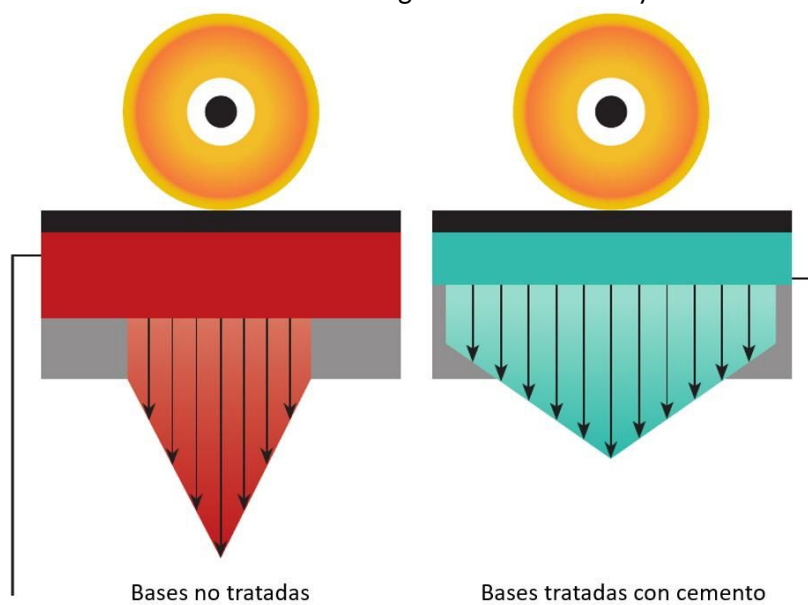


Figura 5. Distribución de esfuerzos de bases no tratadas y tratadas.

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. MOVILIDAD Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial	1. FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN 2. PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

Tomado de (Halsted et al., 2006).

Adicionalmente, al tratar las bases granulares, en las zonas con un nivel freático alto se mejora la resistencia a la acción capilar que puede causar un ablandamiento y pérdida de resistencia de la base granular (Halsted et al., 2006), como se muestra en la Figura 6.

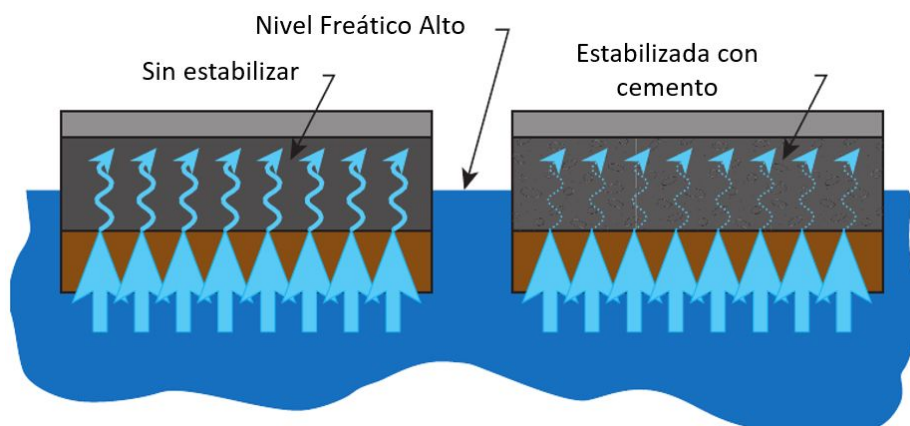


Figura 6. Capilaridad de bases granulares no tratadas y tratadas.
Tomado de (Halsted et al., 2006).

Este proyecto tiene como objetivo mejorar la erodabilidad de las bases granulares empleadas en los pavimentos rígidos del espacio público de Bogotá, alineándose con los lineamientos del Programa 6: "Espacio público seguro e inclusivo" y "Movilidad segura e inclusiva", establecidos en el objetivo estratégico "Bogotá avanza en seguridad", según lo dispuesto en el artículo 7 del Plan Distrital de Desarrollo (Alcaldía de Bogotá, 2024). Asimismo, contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 9: "Industria, Innovación e Infraestructura" y 11: "Ciudades y Comunidades Sostenibles" (ONU, 2015).

Para alcanzar este propósito, se empleará Base Granular tipo B, mejorada con una adición de cemento al 3% que de ahora en adelante será llamada BG-Cemento 3%, cal al 6% llamada ahora BG-Cal 6% y emulsión asfáltica al 1% que para esta investigación se llamará BG-Emulsión 1%. Las muestras serán curadas durante 28 días y sometidas a 12 ciclos de humedecimiento y secado, según el protocolo de la norma INV E-612-13 (Instituto Nacional de Vías, 2013c). El uso de bases no erodables permite construir infraestructuras más resistentes, disminuyendo el impacto ambiental al reducir la necesidad de reparaciones frecuentes y el consumo de materiales adicionales.

2. JUSTIFICACIÓN

La Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial (UAERMV) desempeña un papel esencial en el marco del Plan Distrital de Desarrollo (PDD) "Bogotá Camina Segura" 2024-2027. Este plan tiene como objetivo transformar a Bogotá en una ciudad enfocada en el bienestar y la igualdad de oportunidades, con un firme compromiso con la acción climática y la justicia ambiental. En este contexto, la presente investigación se justifica por su capacidad para identificar avances en el desarrollo de infraestructuras más resistentes, sostenibles y seguras, que contribuirán al bienestar social y a la protección del medioambiente, involucrándose en la participación de diferentes compromisos que se definen para lograr los objetivos propuestos en los siguientes escenarios.

	1. FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN 2. PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

2.1. Alineación con el Plan Distrital de Desarrollo

El Plan Distrital de Desarrollo "Bogotá Camina Segura" establece una visión integral y sostenible para la ciudad. La investigación se enmarca en el objetivo estratégico del plan:

- **Objetivo Estratégico: Bogotá Ordena su Territorio y Avanza en su Acción Climática**
 - o **Acción Climática y Justicia Ambiental:** La UAERMV contribuye significativamente a este objetivo mediante la aplicación de materiales de mayor resistencia a la erodabilidad, a fin de disminuir el mantenimiento que estos requieran y, por tanto, reduciendo los gases de efecto invernadero que se producen con la explotación y transporte de materiales vírgenes.
 - o **Movilidad Sostenible:** La UAERMV prioriza el mantenimiento y desarrollo de una red de movilidad sostenible, incluyendo carriles para bicicletas y caminos peatonales, lo cual incentiva el uso de medios de transporte alternativos, alineándose con las metas de reducción de emisiones y mejora de la calidad del aire.

Estas acciones impactan positivamente en la salud pública y el medioambiente, fomentando un uso y disfrute adecuado del espacio público y promoviendo asentamientos humanos seguros y sostenibles. Además, la investigación se centra en la aplicación de productos que mejoren la calidad de los materiales, favorezcan una mejor calidad ambiental al reducir la necesidad de reparaciones frecuentes y el consumo de materiales adicionales, alineándose directamente con las políticas públicas distritales en materia de Ambiente, Gobierno y Planeación.

2.2. Contribución al Plan Nacional de Desarrollo:

La investigación también responde a los compromisos del Plan Nacional de Desarrollo, en particular con la meta 4: Transformación Productiva, Internacionalización y Acción Climática. Se promueve un uso eficiente de los recursos para el desarrollo de ciudades. La implementación de infraestructuras más resistentes, objetivo principal de la investigación, busca la conservación y el mantenimiento de los pavimentos. Esto se logra mediante la identificación y evaluación de productos que disminuyan la erosión de las bases granulares.

2.3. Cumplimiento de los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible):

La investigación contribuye a los ODS de la siguiente manera:

- **ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura:** Se enfoca en identificar soluciones al que permitan un ahorro de materiales al mejorar las propiedades mecánicas de estos y cumplir con las metas de infraestructura sostenible mediante procesos industriales limpios y el fomento de la innovación y la investigación.
- **ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles:** Busca reducir el impacto negativo ambiental, mejorando la calidad de los materiales mediante la disminución de la erodabilidad de los materiales, resultando en un ahorro de materiales vírgenes.

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. MOVILIDAD Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial	1. FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	
	2. PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023		

En resumen, la investigación apoya el desarrollo de infraestructuras sostenibles, mejora la calidad ambiental y contribuye a la formación de una ciudad más segura y saludable, en consonancia con los objetivos del PDD, el Plan Nacional de Desarrollo y los ODS.

3. ALCANCE

El alcance de este proyecto consiste en realizar una evaluación mecánica de la erodabilidad de las bases granulares empleadas en la conservación del espacio público por la UAERMV, las cuales han sido mejoradas con distintos productos cementantes o ligantes.

4. OBJETIVOS

A continuación, se presentan los objetivos que tiene la realización de este proyecto:

4.1. Objetivo General

Evaluar la resistencia de diferentes productos para las bases granulares, a fin de comparar el desempeño del material ante esta solicitud.

4.2. Objetivos Específicos

- Realizar una revisión bibliográfica sobre materiales no erodables.
- Realizar ensayos para evaluar la erodabilidad de las bases granulares.
- Análisis de los resultados obtenidos.

5. MARCO TEÓRICO Y NORMATIVO

El estudio de la erodabilidad de las bases granulares se fundamenta en una combinación de conceptos teóricos y prácticos que abordan la resistencia de los materiales a la erosión y su comportamiento bajo diversas condiciones ambientales y de carga. A continuación, se presenta un marco teórico que respalda la investigación en este campo.

5.1. Base Granular

Una base granular es una capa de pavimento que consta de una granulometría definida por la especificación IDU 510-18 sobre "Base y Subbase granular para vías vehiculares". En la Tabla 1 se presenta la granulometría que debe presentar una base granular (Instituto de Desarrollo Urbano, 2018a).

Tabla 1. Granulometrías admisibles para la construcción de bases granulares.

Tipo de capa		Tamiz (mm/U.S. Standard)											
		50.0	37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75	2.38	1.16	0.425	0.150	0.075
		2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 16	No. 40	No. 100	No. 200
		% Pasa											
Base	BG38	-	100	72/94	60/88	47/77	40/70	28/50	18/38	12/30	6/20	3/14	2/10
	BG25	-	-	100	78/98	60/87	50/80	35/60	24/45	16/34	8/22	4/14	2/10
Tolerancias		± 7%						± 6%					± 3%

5.2. Subbase Granular para vías peatonales

Una subbase granular es una capa de pavimento de menor calidad que la base granular, que consta de una granulometría definida por la especificación IDU 512-18 sobre "Subbase Granular para vías

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. MOVILIDAD Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial	1. FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN 2. PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

peatonales y ciclorutas con agregados naturales". En la Tabla 2 se presenta la granulometría que debe presentar una subbase granular (Instituto de Desarrollo Urbano, 2018c)

Tabla 2. Granulometrías admisibles para la construcción de bases granulares.

Tipo de capa		Tamiz (mm/U.S. Standard)												
		63.5	50.0	37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75	2.38	1.16	0.425	0.150	0.075
		2.5"	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 16	No. 40	No. 100	No. 200
		% Pasa												
Base	SBG PEA 50	-	100/100	89/100	68/94	54/86	42/73	34/64	22/48	15/38	10/29	5/20	2.5/15	1.5/13
	SBG PEA 64	100/100	90/100	76/98	60/89	50/80	39/70	32/62	22/48	15/38	10/29	5/20	2.5/15	1.5/13
Tolerancias			± 7%					± 4%					± 2%	

5.3. Erosión y erodabilidad

La erosión es el proceso mediante el cual se presenta una pérdida de material superficial debido a la acción de agentes erosivos como el agua, el aire y el tráfico vehicular. De acuerdo con IDU y la Universidad de Los Andes (2016), este fenómeno se desarrolla cuando el agua libre que se encuentra en la superficie del pavimento ingresa a la estructura a través de las juntas y, ante la presencia de una carga de un vehículo que se aproxima a esta zona, es impulsada a altas velocidades sobre la interfase horizontal que existe entre la placa de concreto y la capa de base. La erodabilidad por su parte, se refiere a la susceptibilidad de un material a presentar erosión (IDU & Universidad de Los Andes, 2016). Vale la pena resaltar que, la erodabilidad es una característica intrínseca de un material y que la erosión es un proceso físico.

5.4. Resistencia a la erosión

La resistencia a la erosión de un material granular depende de varios factores, incluyendo la cohesión entre partículas, la densidad de compactación y la presencia de materiales finos que puedan ser arrastrados por el agua. Los materiales seleccionados deben tener una baja susceptibilidad a ser desplazados y deben mantenerse estables bajo condiciones de flujo de agua (IDU & Universidad de Los Andes, 2016).

6. ANTECEDENTES

Para el planteamiento del presente proyecto, se encontraron los siguientes antecedentes:

En Colombia, el IDU y la Universidad de Los Andes (2016) realizaron el ensayo de pista acelerado a diferentes estructuras de pavimento rígido, con bases estabilizadas con cemento de baja resistencia, cemento de resistencia media, cemento de resistencia alta, base estabilizada con emulsión asfáltica, base asfáltica y base granular sin estabilizar. El estudio recomienda realizar mantenimientos rutinarios (sello de juntas) a los pavimentos rígidos. Los pavimentos con placas de concreto de 15 cm y cargas intermedias con frecuencias de tráfico baja a media, pueden presentar procesos erosivos severos. El estudio señala que la utilización de cemento de alta resistencia para estabilizar las bases granulares proporciona una mayor resistencia a la erosión con respecto a una sin adición de cementantes, lo que permite al material soportar tráficos de intensidad intermedia.

Por su parte, Fedrigo et al. (2017) evaluaron la erodabilidad, resistencia a la compresión confinada, contracción por secado, ascenso capilar y absorción de mezclas tratadas con cemento considerando diferentes contenidos de RAP, contenidos de cemento, esfuerzos de compactación y tiempos de curado. Se encontró que el incremento en el contenido de cemento causó una reducción en absorción, ascenso capilar y erodabilidad. Los contenidos de cemento de menos del 2%, produjeron mezclas con valores de resistencia a la compresión aceptables, pero se hace la

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. MOVILIDAD Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial	1. FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN 2. PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

aclaración de que el material no debe estar expuesto al agua por mucho tiempo. El contenido de cemento óptimo definido en el artículo es del 4%, pues la resistencia a la compresión inconfina aumentó en un 70% con respecto a una muestra con un 2% de cemento.

La Federal Highway Administration (2017) al realizar un análisis técnico en donde se entrega una vista general de la mejores prácticas para el diseño y la construcción de bases y subbases para los pavimentos rígidos y sus efectos en el rendimiento, entregó los tipos de base y subbase comúnmente utilizados en pavimentos rígidos, en donde se menciona que se utilizan bases tratadas con cemento, bases de concreto, bases tratadas con cemento de gradación abierta para drenaje, bases tratadas con asfalto, bases asfálticas densas y bases asfálticas de gradación abierta para drenaje.

En la ciudad de Bogotá, se tiene la especificación 520-18 del Instituto de Desarrollo Urbano (2018) que relata la normatividad para bases y subbases granulares mejoradas con cemento hidráulico, en donde se recomienda un contenido de 3% de cemento mínimo para mejoramiento de base y subbase granular, este valor debe ir aumentando de acuerdo con los requisitos de resistencia a la compresión y pruebas de durabilidad.

El Instituto de Desarrollo Urbano, recomienda la utilización de emulsión asfáltica para mejorar bases y subbases granulares, la especificación 522-18 se tiene para este fin, pero no se indica ningún porcentaje de emulsión asfáltica en específico (Instituto de Desarrollo Urbano, 2018b).

En la investigación de Dhakal & Chopra (2022), se utilizaron agregados de demolición del campus sur de la Universidad de Chandigarh y se trató con cal, para ser usado en bases granulares, como bases granulares tratadas con cal en pavimentos flexibles. Se encontró que el porcentaje óptimo de cal es del 6%, pues aumentó 2,74 veces la resistencia a la compresión simple del material con respecto a una muestra con un contenido de cal del 4%. Además, a pesar de que al agregar 8% de cal aumenta la resistencia a la compresión en un 96% con respecto a la muestra con un contenido de cal del 6%, no se recomienda este contenido de cal, porque podría provocar un comportamiento frágil en el material mejorado.

Recientemente, un estudio realizado por la Universidad de Los Andes analizó el uso de una mesa vibratoria vertical como herramienta para caracterizar la susceptibilidad a la erosión de los materiales empleados en capas de base granular de pavimentos rígidos, comparándolos con los resultados obtenidos mediante el ensayo de humedecimiento y secado. En esta investigación, se estabilizaron bases granulares con diferentes aditivos y proporciones: cemento hidráulico al 6,1%, 7,5% y 8%, aunque no se tuvo en cuenta el comportamiento frágil que presenta el material en porcentajes de cemento añadidos de más del 6%; emulsión asfáltica al 6,1%; y mezcla asfáltica en caliente al 4,3% del peso total. Los resultados indicaron que, entre los tres contenidos de cemento hidráulico evaluados, la base granular estabilizada con 6,1% presentó la mayor pérdida de material tras el ensayo de humedecimiento y secado, con un 4,03%. Le siguieron la base con 7,5% de cemento, con una pérdida de 3,75%, y la base estabilizada con emulsión asfáltica al 6,1%, con un 3,52%. En contraste, la base con 8% de cemento mostró una pérdida menor, del 3,43%. Finalmente, la base granular estabilizada con mezcla asfáltica en caliente demostró la mayor resistencia a la erosión, presentando las menores pérdidas durante los ensayos (Caicedo & Caro, 2023).

7. METODOLOGIA

Para el desarrollo de este proyecto se llevó a cabo la siguiente metodología:

7.1. Revisión bibliográfica

Inicialmente se realizó una revisión bibliográfica, en donde se determinaron los materiales que se iban a utilizar para mejorar la resistencia a la erosión de las bases granulares. Los documentos

	1. FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	
	2. PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023		

consultados son los estudios de Dhakal & Chopra (2022), Fedrigo et al. (2017), Federal Highway Administration (2017), IDU & Universidad de Los Andes (2016), Instituto de Desarrollo Urbano (2018a), Instituto de Desarrollo Urbano (2018b). Se determinó que los materiales para mejorar la resistencia a la erosión serían cemento hidráulico al 3% y cal hidratada al 6%. En cuanto a la emulsión asfáltica, se define un porcentaje bajo de adición, teniendo en cuenta su costo elevado frente a las otras alternativas, en este sentido, se pretende evaluar la respuesta de una base granular con adición de 1% de emulsión asfáltica.

7.2. Granulometría

Para asegurar que el material utilizado fuera consistente, se realizó el ensayo de granulometría de las partículas, teniendo en cuenta que la granulometría esperada es la de una base granular tipo B (Instituto Nacional de Vías, 2013a).

7.3. Determinación de la humedad óptima

Para cada uno de los materiales utilizados para mejorar la resistencia a la erosión de la base granular se halló la respectiva humedad óptima, de acuerdo con la norma INVIAS (2013a) para poder realizar el ensayo de humedecimiento y secado

INV E-612-13. En la Figura 7 se muestra el equipo que se utilizó para hallar la humedad óptima del material.

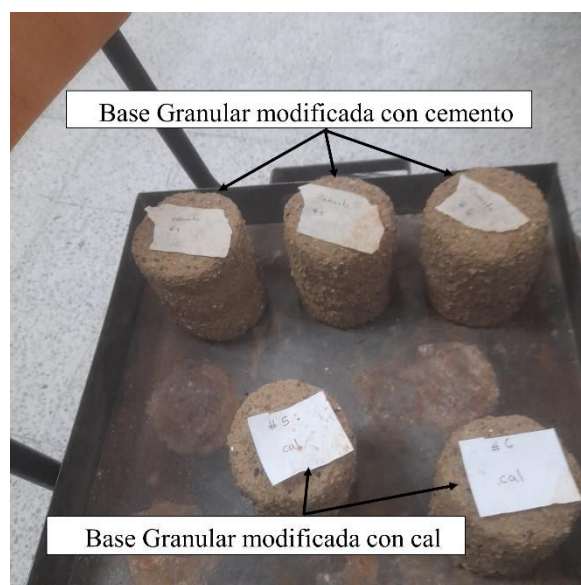


Figura 7. Compactación de muestra para hallar humedad óptima.

	1. FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	
	2. PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023		

7.4. Compactación de base granular

De acuerdo con la INV E-612-13, se realizó el respectivo mejoramiento de las bases granulares, para posteriormente ser compactadas con el martillo y recipiente del ensayo de próctor modificado (Instituto Nacional de Vías, 2013c). En la Figura 8, se muestran las probetas de base granular estabilizada con cal y cemento.



7.5. Curado

De acuerdo con el Instituto Americano del Concreto, el curado se realiza para mantener las condiciones de humedad y temperatura de una mezcla cementosa recién colocada, con el fin de que esta alcance sus propiedades potenciales mecánicas (American Concrete Institute, 2016). Se realizó el curado de cada uno de los materiales, por un periodo estimado de 28 días para realizar el ensayo de Humedecimiento y Secado INV E-612-13 y para realizar el ensayo de compresión simple (Instituto Nacional de Vías, 2013d, 2013c). La Figura 9 muestra las probetas siendo sometidas al proceso de curado, el material se encuentra sumergido hasta que cumple edades de 7, 14 y 28 días.

Figura 8. Probetas compactadas.

	1. FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN 2. PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

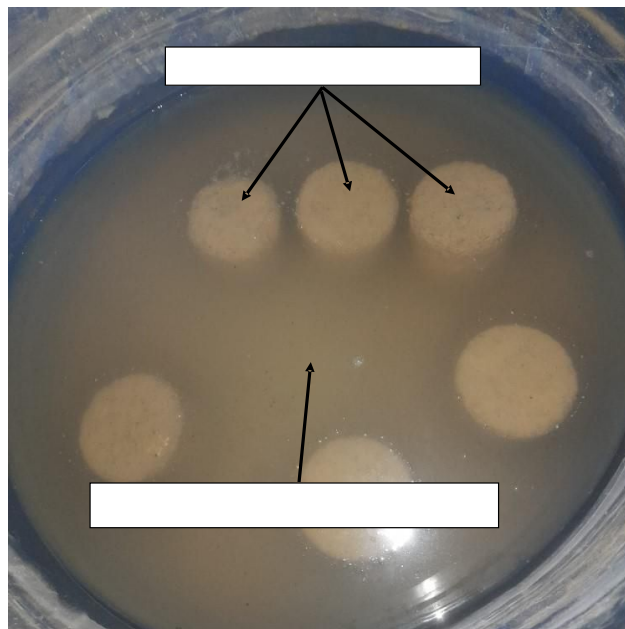


Figura 9. Curado de las probetas.

7.6. Compresión Simple

Luego de curar las probetas, se realizó el ensayo de resistencia a la compresión de cilindros moldeados, de acuerdo con la INV E-614-13 (Instituto Nacional de Vías, 2013d). La Figura 10 muestra cómo se somete una probeta a compresión.

	1. FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	
	2. PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023		

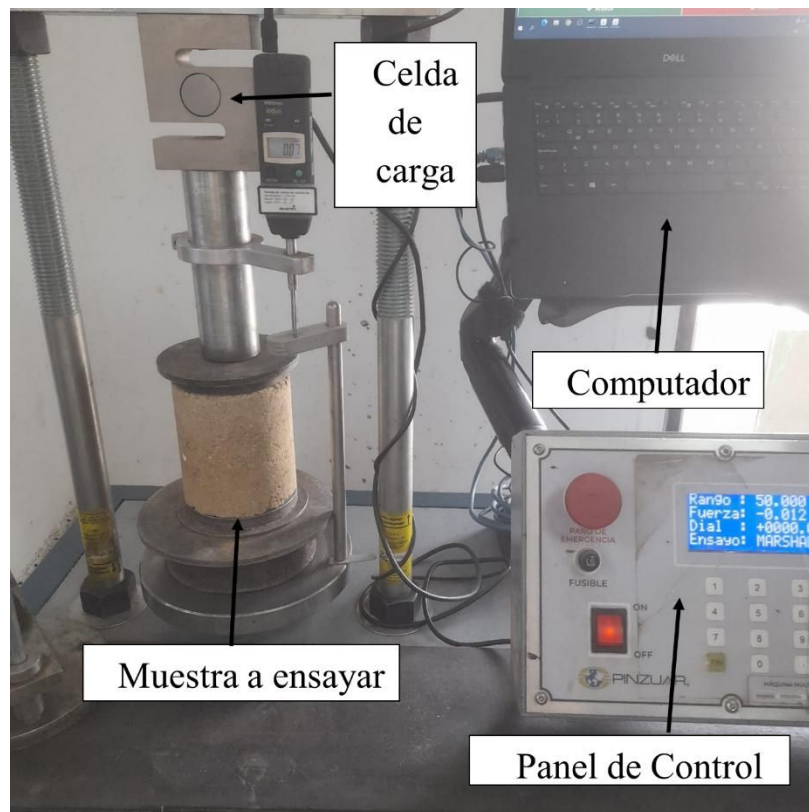


Figura 10. Probeta sometida a compresión.

8. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el desarrollo del presente proyecto se llevaron a cabo las siguientes actividades:

8.1. Granulometría

	1. FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN 2. PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

Al realizar el ensayo de granulometría de acuerdo con la norma INV E-213, en la Figura 11 se muestra el resultado del ensayo.

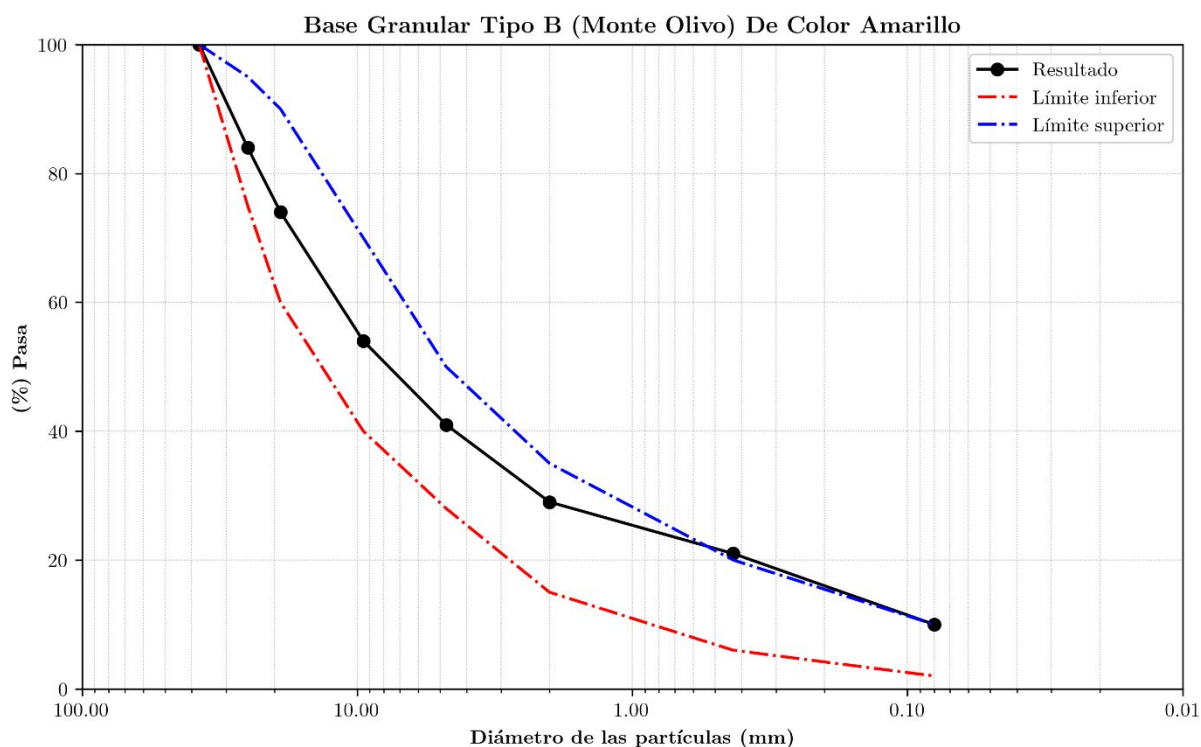


Figura 11. Granulometría de Base Granular B

La granulometría esperada en general para todos los especímenes a ensayar era la de una base granular tipo B. Sin embargo, como se muestra en la figura anterior, para el tamiz N° 40, el porcentaje de material que pasa supera en un 1% el límite superior de la especificación, por lo que la base granular a ensayar es un 1% más fina de lo esperado, aunque la especificación IDU 510-18 otorga una tolerancia de $\pm 6\%$ para este tamiz.

8.2. Determinación de la cantidad de material que pasa el tamiz de 75 μm (No. 200) en los agregados pétreos mediante lavado.

Después de hallar la granulometría de la base granular, se realizó un lavado al material, obteniendo los resultados de la Tabla 3.

Tabla 3. Material fino obtenido por lavado.

Ítem	Unidad	Valor
B: Masa Original de la muestra seca.	g	10443,5
C: Masa de la muestra seca después de lavada	g	9384,7
A: Material fino que pasa el tamiz N° 200 obtenido por lavado	%	10

	1. FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN 2. PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

De acuerdo con la INV E-214-13, se registra el porcentaje de material fino obtenido por lavado, el cual es de 10.14%, sin embargo, esta norma indica que se debe aproximar este valor al entero más cercano dando como resultado un valor de 10%, encontrándose en línea con los requisitos establecidos en la norma técnica que regula el ensayo de este material (Instituto Nacional de Vías, 2013b).

El valor de material que pasa por el tamiz No. 200 mostrado en la Tabla 3, revela la susceptibilidad a la erosión que presenta este material dado su alto porcentaje de finos con respecto a lo que indica la norma INV E-214-13. Dada esta susceptibilidad a la erosión, es necesario el uso de materiales cementantes para mejorar el material, lo que da sentido a este estudio.

8.3. Humedad Óptima

Para hallar la humedad óptima y su respectiva densidad seca máxima, se realizan los siguientes ensayos de Proctor Modificado.

8.3.1 Base Granular Tipo B (Monte Olivo) de color amarillo

Para la Base Granular Tipo B sin ningún tipo de modificador, se obtuvo una humedad óptima de aproximadamente 9,8%, de acuerdo con la Figura 12.

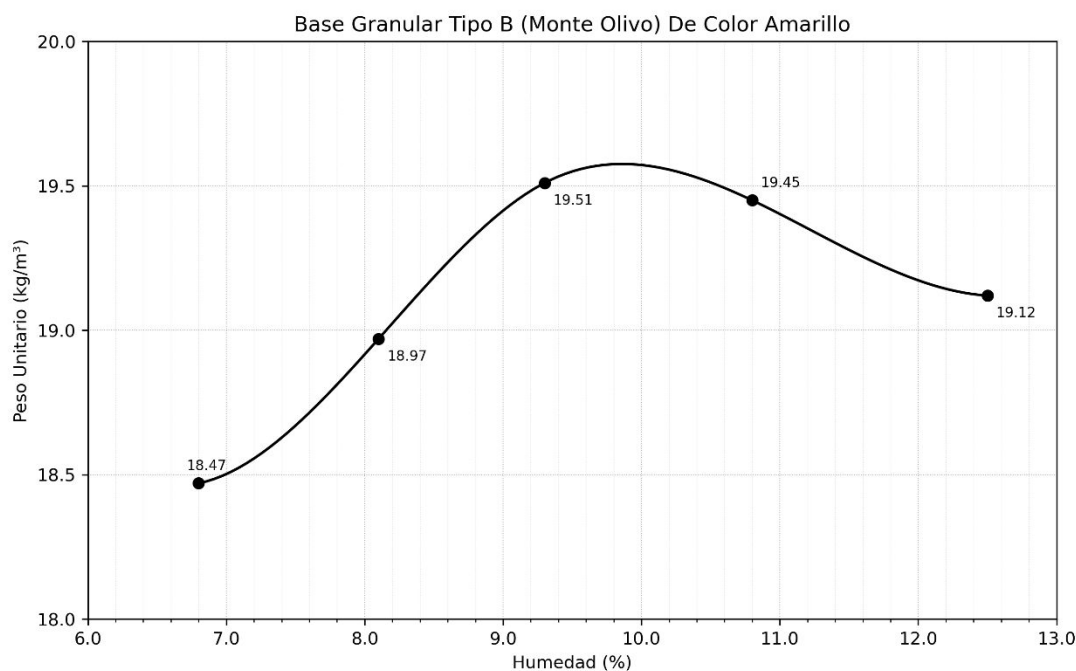


Figura 12. Humedad óptima de Base Granular Tipo B.

8.3.2 Base Granular Tipo B con 3% de cemento UG (BG-Cemento 3%)

	1. FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN 2. PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

La Base Granular Tipo B con 3% de cemento de uso general, se obtuvo una humedad óptima de aproximadamente 10,8%, de acuerdo con la Figura 13.

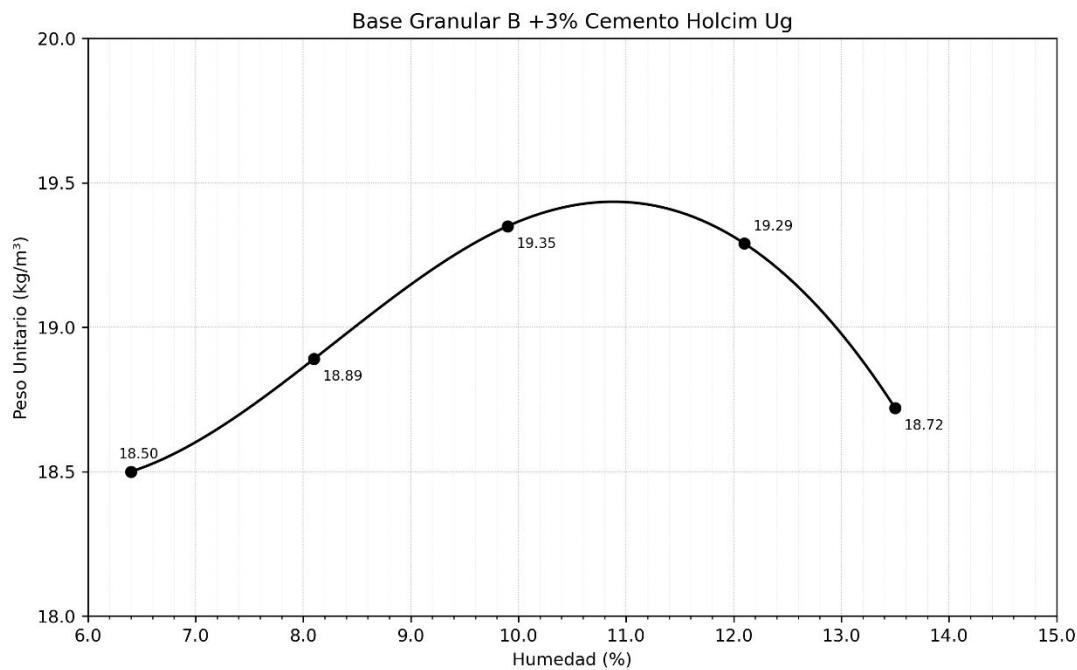


Figura 13. Humedad óptima de Base Granular Tipo B con 3% de cemento.

8.3.3 Base Granular Tipo B con 6% de Cal Hidratada (BG-Cal 6%)

La Base Granular Tipo B con 6% de cal hidratada, se obtuvo una humedad óptima de aproximadamente 11%, de acuerdo con la Figura 14.



ALCALDÍA MAYOR
DE BOGOTÁ D.C.
MOVILIDAD
Unidad Administrativa Especial de
Rehabilitación y Mantenimiento Vial

1. FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
2. PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES

CÓDIGO: DMIC-FM-002

VERSIÓN: 1

FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023

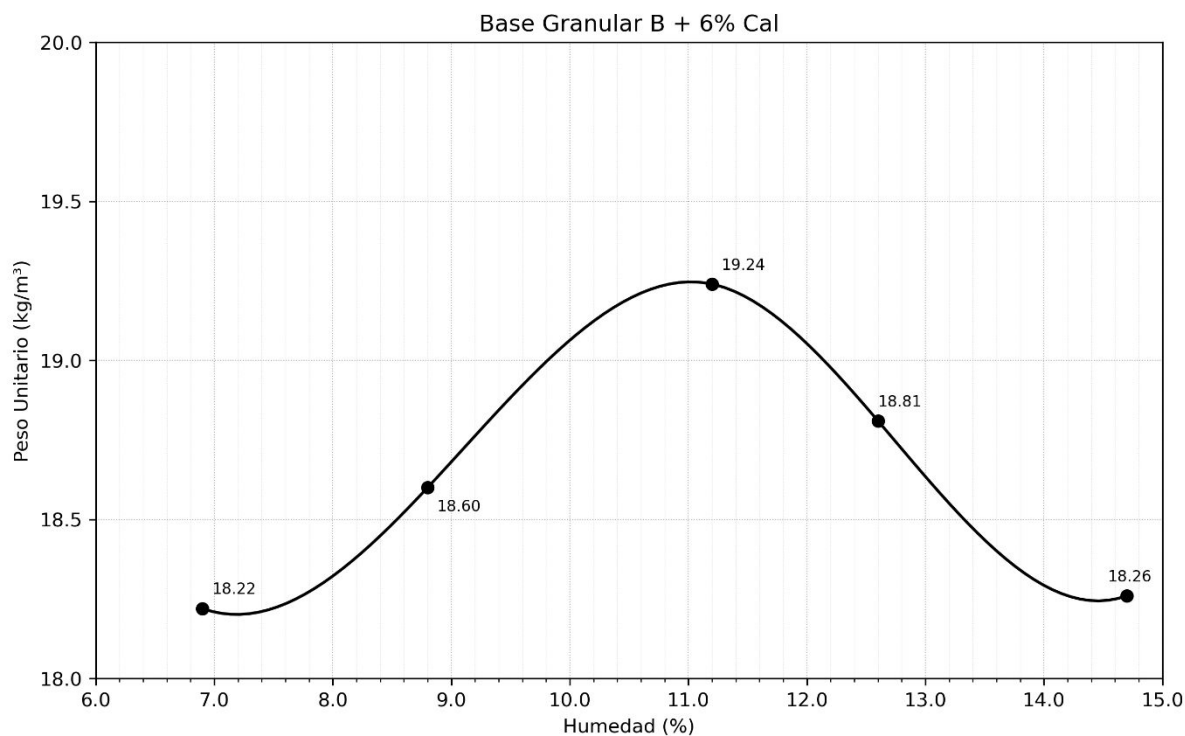


Figura 14. Base Granular Tipo B con 6% de Cal.

8.3.4 Base Granular Tipo B con 1% de Emulsión CRL-1 (100-250) (BG-Emulsión 1%)

La Base Granular Tipo B con 1% de emulsión catiónica de rotura lenta, se obtuvo una humedad óptima de aproximadamente 10,6%, de acuerdo con la Figura 15.

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. MOVILIDAD Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial	1. FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN 2. PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

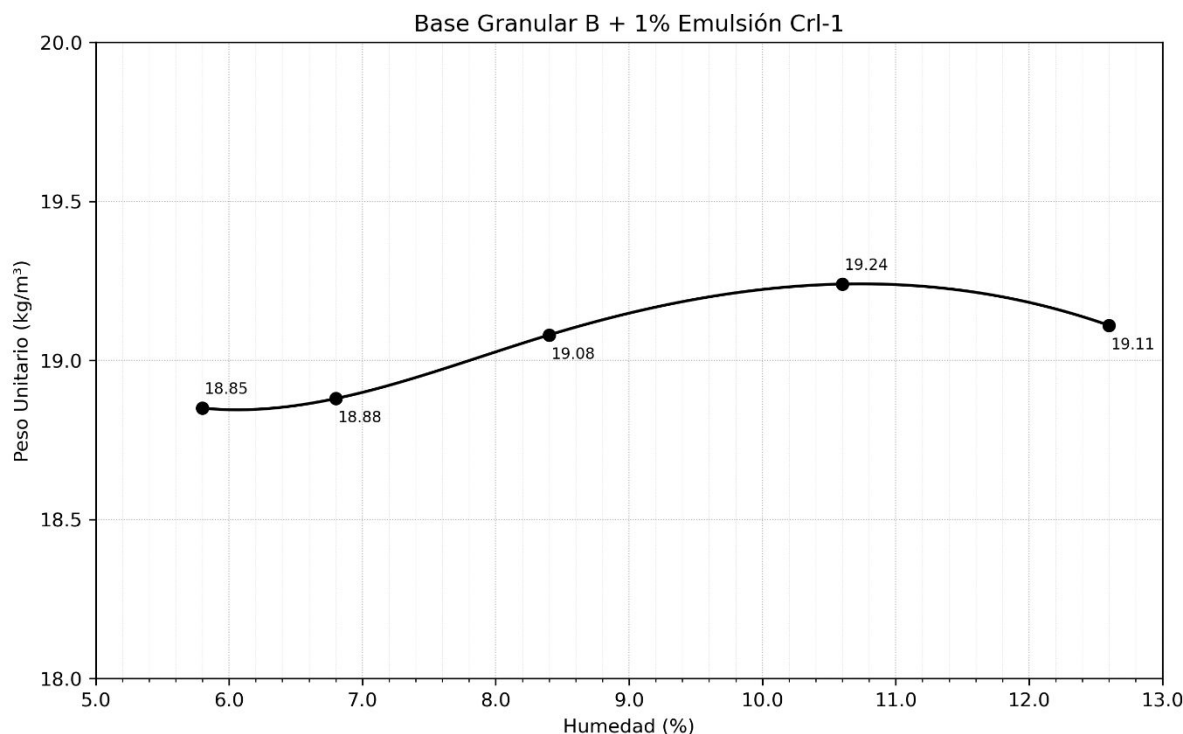


Figura 15. Base Granular Tipo B con 1% de Emulsión CRL-1.

Como resultado del ensayo Proctor modificado para todas las bases utilizadas en el presente estudio, se pudo determinar que, utilizar diferentes materiales para mejorar la Base Granular Tipo B aumenta la humedad óptima del material, pero reduce la densidad seca máxima.

Finalmente, en la Tabla 4 se muestra un resumen de la humedad óptima, densidad seca máxima y el peso unitario seco máximo de los materiales estudiados en la presente investigación.

Tabla 4. Resumen de Humedad óptima, Densidad Seca Máxima y Peso Unitario Seco Máximo.

Material	Humedad Ópt (%)	Densidad Seca Máx (kg/m³)	Peso Unitario Seco Máximo (kg/m³)
Base Granular Tipo B	9,8	1989	19,51
BG-Cemento 3%	10,8	1972	19,35
BG-Cal 6%	11	1961	19,24
BG-Emulsión 1%	10,6	1961	19,24

Teniendo en cuenta los resultados del ensayo de Proctor modificado presentados en la Tabla 4, se evidencia que la densidad seca máxima de la BG-Cal 6% y BG-Emulsión1% son similares, mientras que la densidad seca máxima de la BG-Cemento 3% es superior. Este comportamiento puede llegar a indicar que la BG-Cemento 3% puede tener mejor comportamiento a resistencia a la compresión que las otras

 ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. MOVILIDAD Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial	1. FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN 2. PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

dos bases, así mismo, se espera que la resistencia a compresión de la BG-Cal 6% y la BG-Emulsión 1% sean similares.

8.4. Ensayo de humedecimiento y secado

El ensayo de humedecimiento y secado, según la norma INVE 612, consiste en tamizar un material granular de base, compactarlo para formar probetas, someter las probetas a un proceso de curado y, posteriormente, rayar la superficie del material con un cepillo de cerdas metálicas, aplicando una fuerza de 1 kg sobre toda la superficie de la probeta. Luego de realizar el ensayo de humedecimiento y secado, los porcentajes de pérdidas de cada material se muestran a continuación:

8.4.1 Porcentaje de Pérdidas de BG-Cemento 3%

Al adicionar un 3% de cemento a la base granular tipo B, se encontró lo que se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Porcentaje de Pérdidas de Base Granular Tipo B con 3% de Cemento.

CICLO	MASA SSS (g)				MASA DESPUES DE RAYADO (g)			
	No. 1	No. 2	No. 3	Promedio	No. 1	No. 2	No. 3	Promedio
1	2059,5	2047,3	2034,5	2047,1	1859,3	1852,8	1836,8	1849,6
2	2037,8	2031	2012,8	2027,2	1839,4	1811,2	1811,2	1828,7
3	2017	2012,2	1986,5	2005,2	1815,6	1787,9	1787,9	1805,9
4	1990,2	1988,4	1958,7	1979,1	1784,8	1760,6	1760,6	1778,2
5	1955,7	1960,4	1929,5	1948,5	1762	1726,4	1726,4	1751,4
6	1930,2	1931,4	1891,9	1917,8	1709,3	1702,4	1702,4	1689,8
7	1827,8	1757,3	1795,8	1793,6	1671,2	1615,6	1615,6	1631,3
8	1775,3	1710,1	1742,6	1742,7	1622,6	1592,9	1592,9	1592,7
9	1734,1	1669,1	1699,6	1700,9	1585,1	1525,6	1525,6	1555
10	1696,2	1670	1639	1668,4	1550,3	1499,7	1499,7	1525,3
11	1567,3	1589,1	1613,4	1589,9	1432,6	1475	1475	1453,5
12	1514,4	1524,2	1538,5	1525,7	1386,1	1408,9	1408,9	1396,7

La masa inicial del material ensayado fue de 2047,1 g, después de 12 ciclos de humedecimiento y secado, se obtuvo una masa seca de 1359,1 g. La Figura 17 muestra la tendencia de pérdidas después de cada ciclo de rayado.

8.4.2 Porcentaje de Pérdidas de BG-Cal 6%

La base granular tipo B con adición de 6% de cal, luego de 12 ciclos de humedecimiento y secado presentó los resultados que se muestran Tabla 6.

	1. FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	
	2. PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023		

Tabla 6. Porcentaje de Pérdidas de Base Granular Tipo B con 6% de cal.

CICLO	MASA SSS (g)				MASA DESPUES DE RAYADO (g)			
	No. 1	No. 2	No. 3	Promedio	No. 1	No. 2	No. 3	Promedio
1	2000,8	1979,3	1997,1	1992,4	1533,4	1761,4	1787,2	1694
2	1978,77	2004	2014,1	7935,3	1460,4	1684,9	1665,8	1603,7
3	1706,3	1864,3	1907,6	1826,1	1333,7	1595,9	1572,8	1500,8
4	1620,8	1841,3	1866,1	1776,1	1206,2	1452	1446,1	1368,1
5	1477,4	1740,1	1767,2	1661,6	1089,9	1374	1371,6	1278,5
6	1335,5	1599,1	1607,2	1513,9	1018,9	1294,8	1303,4	1205,7
7	1205,7	1514,2	1518,6	1412,8	954,5	1278,4	1265,7	1166,2
8	1125,6	1438,7	1430,6	1331,6	852,9	1191,8	1179,4	1074,7
9	943,8	1303,2	1315,5	1187,5	0	1135,2	1136,2	1135,7
10	0	1256,3	1253,2	1254,8	0	1099,4	1093	1096,2
11	0	1214,3	1204,5	1209,4	0	1035,7	1011,3	1023,5
12	0	1145	1118,3	1131,7	0	975,7	956,1	965,9

La masa inicial del material ensayado fue de 1992,4 g, después de 12 ciclos de humedecimiento y secado, se obtuvo una masa seca de 939,5 g.

8.4.3 Porcentaje de Pérdidas de BG-Emulsión 1%

Las muestras de base granular tipo B con 1% de Emulsión CRL-1 no resistieron después del curado y se desmoronaron (Figura 16), por lo cual no se pueden presentar datos en este apartado.



	1. FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	
	2. PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023		

Figura 16. Muestra con 1% de emulsión desmoronada.

Para resumir, la Figura 17 muestra los promedios de pérdidas que presentó la Base Granular con 3% de cemento (BG-Cemento 3%) y la Base Granular con Cal 6% (BG-Cal 6%).

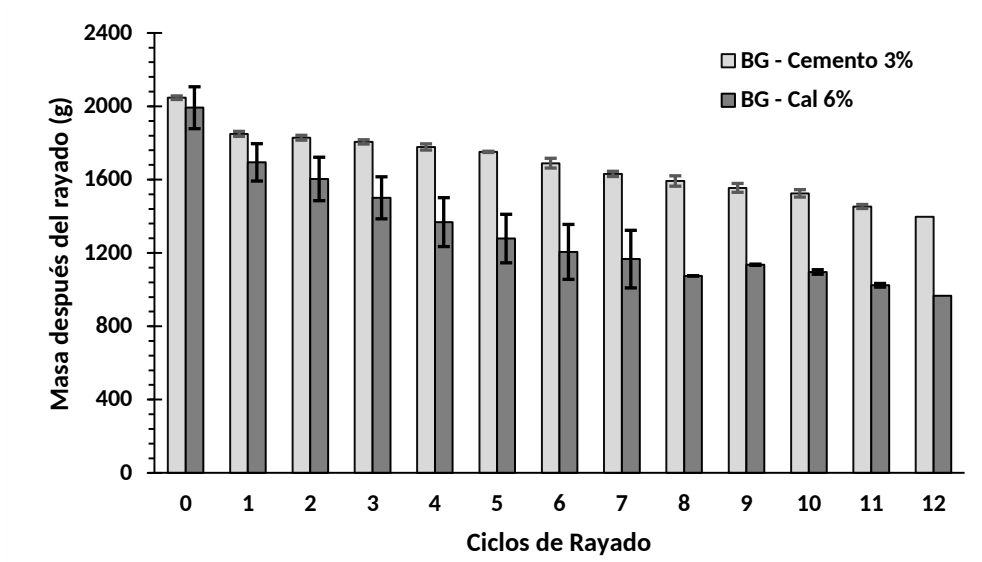


Figura 17. Masa de los materiales después de cada ciclo de rayado.

La BG-Cemento 3% presentó pérdidas totales por erosión del 27,2% en los 12 ciclos, evidenciando una pérdida de 9,65% en el primero, mientras que los siguientes ciclos se enmarcan en pérdidas de 1,13% hasta 4,71%. Por su parte, la BG-Cal 6% presentó pérdidas totales de 47,9% evidenciando que en el primer ciclo hubo pérdidas de 14,98%, mientras que en el resto de los ciclos se presentan pérdidas entre 3,28% y 8,84%. Estos resultados demuestran que, con los porcentajes de materiales adicionados, el cemento mejora la resistencia a la erosión de las bases en aproximadamente 43% con respecto a una base adicionada con cal.

Debido a los resultados experimentales de la Base Granular Tipo B con 1% de emulsión CRL-1, no se recomienda el uso de emulsiones asfálticas en estas proporciones como mejorador de Bases Granulares.

Finalmente, en la Figura 17 se presenta la desviación estándar de los datos, la cual se divide en el promedio para realizar un análisis estadístico adecuado. Este análisis permite detectar que los resultados obtenidos de la BG-Cal 6% y la BG-Cemento 3% presentan coeficientes de variación inferiores a 15% y 2% respectivamente, identificando estadísticamente los datos presentan alto grado de confiabilidad.

8.5. Ensayo de Resistencia a la Compresión Simple

	1. FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	
	2. PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023		

Al tiempo que se curaban las muestras para realizar el ensayo de humedecimiento y secado, se curaron muestras para el ensayo de compresión simple, los resultados por cada material se muestran a continuación:

8.5.1 Base Granular Tipo B con 3% de Cemento

La base granular tipo B con 3% de cemento, obtuvo los resultados a compresión que se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Resistencia a la compresión de la Base Granular Tipo B con 3% de Cemento.

N°	Edad (días)	Dimensiones (mm)		Carga máxima	Resistencia a la compresión	
		Diámetro	Altura			
				kN	Lb	MPa
1	7	100,87	118,3	0,0080	15,66	3521
		100,85	118,56			
		100,89	118,47			
		-	118,38			
2	7	101,63	117,38	0,0081	16,87	3793
		101,65	117,11			
		101,67	117,2			
		-	-			
3	7	101,63	117,38	0,0081	16,50	3709
		101,6	117,43			
		101,6	117,43			
		-	117,47			

8.5.2 Base Granular Tipo B con 6% de Cal

La Tabla 8 muestra los resultados de resistencia a la compresión de la base granular tipo B con 6% de cal.

Tabla 8. Resistencia a la compresión de la Base Granular Tipo B con 6% de Cal.

N°	Edad (días)	Dimensiones (mm)		Carga máxima	Resistencia a la compresión	
		Diámetro	Altura			
				kN	Lb	MPa
1	7	101,68	117,12	0,0081	7,30	1641
		101,6	117,19			
		101,64	117,26			
		-	117,2			
2	7	102,01	118,61	0,0082	7,48	1682

	1. FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	
	2. PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023		

3	7	101,97	118,52	0,0081	7,16	1610	0,88
		102	118,49				
		-	-				
		101,68	118,47				
		101,6	118,29				
		101,64	118,4				
		-	118,33				

8.5.3 Base Granular Tipo B con 1% de Emulsión CRL-1

Finalmente, en la Tabla 9 se muestran los resultados de la resistencia a la compresión de la base granular tipo B con 1% de emulsión asfáltica tipo CRL-1.

Tabla 9. Resistencia a la compresión de la Base Granular Tipo B con 1% de Emulsión CRL-1.

N°	Edad (días)	Dimensiones (mm)		Carga máxima	Resistencia a la compresión		
		Diámetro	Altura		kN	Lb	MPa
1	7	101,68	117,12	0,0081	7,30	1641	0,91
		101,6	117,19				
		101,64	117,26				
		-	117,2				
2	7	102,01	118,61	0,0082	7,48	1682	0,91
		101,97	118,52				
		102	118,49				
		-	-				
3	7	101,68	118,47	0,0081	7,16	1610	0,88
		101,6	118,29				
		101,64	118,4				
		-	118,33				

Para finalizar este apartado, es importante resaltar que la resistencia a la compresión de la Base Granular Tipo B con 3% de cemento luego de 7 días de curado fue de 2.02 MPa, la del material mejorado con 6% de cal fue de 0.9 MPa y la del material mejorado con 1% de emulsión CRL-1 fue de 0.97 MPa. Esto indica que el cemento es el mejor material para la modificación de bases con respecto a la resistencia a la compresión, pues la incrementa un 102,05% con respecto a la BG-Cal 6% y un 108.3% con respecto a la BG-Emulsión 1% como se observa en la Figura 18.

	1. FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	
	2. PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023		

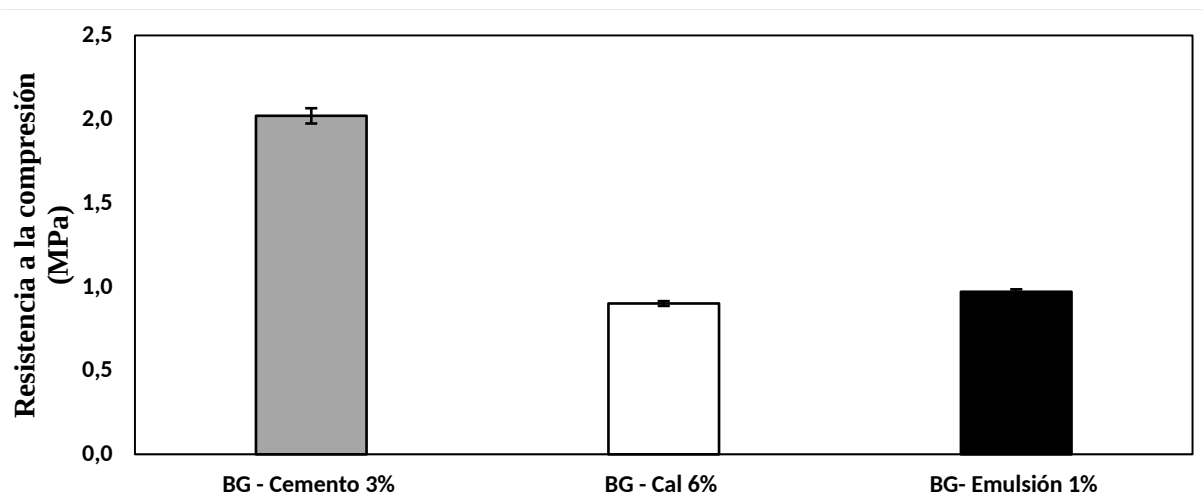


Figura 18. Resistencia a la compresión a los 7 días de curado de las bases granulares mejoradas.

Los resultados presentados anteriormente, evidencian que la resistencia a compresión de la BG-Cemento 3% duplican la resistencia de la BG-Cal6%, no obstante, este resultado debe ser evaluado cuidadosamente, ya que la cal podría verse afectada por el limitado tiempo de curado, pues se sabe que para este cementante la reacción puzolánica de la cal es mucho más lenta que la del cemento.

En la Figura 18 se presenta un análisis estadístico de los resultados obtenidos de compresión simple para las diferentes bases mejoradas. Este análisis permite detectar que las desviaciones estándar son relativamente bajas, esto se complementa, al determinar el coeficiente de variación el cual es inferior a 3% para todas las bases evaluadas, de esta forma, se identifica que los resultados obtenidos son estadísticamente confiables.

9. CONCLUSIONES

Este trabajo fue realizado con el fin de evaluar diferentes productos para mejorar la resistencia a la erosión de las bases granulares. Luego de llevar a cabo el plan experimental, se concluye lo siguiente:

- El cemento es el mejor material para mejorar la resistencia a la erosión de la Base Granular Tipo B.
- En este trabajo los resultados de la Base Granular Tipo B con adición de 6% de cal podrían verse afectados por el tiempo de curado de las muestras, pues se sabe que para este cementante la reacción puzolánica de la cal es mucho más lenta que la del cemento, por lo cual se recomienda que en futuras investigaciones se realice la evaluación de la cal como mejorador, con tiempos de curado como mínimo de 28 días.
- No se recomienda el uso de la emulsión asfáltica CRL-1 al 1% como mejorador de la Base Granular Tipo B, pues dicha cantidad de material no es suficiente para generar la adecuada cohesión en el material. Sin embargo, se recomienda el uso de la emulsión CRL-1 como tratamiento superficial para disminuir la erosión de las bases granulares del pavimento del espacio público.

	1. FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN 2. PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

- El ensayo de humedecimiento y secado presenta ciertas limitaciones, ya que los resultados obtenidos dependen de factores como la intensidad con la que se cepillan los especímenes, la técnica utilizada durante el cepillado y la variabilidad inherente entre operadores. Esto implica que los datos generados por una persona que realiza el ensayo pueden diferir de los obtenidos por otra, afectando la reproducibilidad y la confiabilidad del procedimiento.
- Dadas las limitaciones del ensayo de humedecimiento y secado, se recomienda evaluar la posibilidad de realizar el estudio de resistencia a la erosión con otros ensayos.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Alcaldía de Bogotá. (2024). *Plan Distrital de Desarrollo 2024-2027—Bogotá Camina Segura*.

American Concrete Institute. (2016). *308R-16: Guide to External Curing of Concrete*.

Caicedo, B., & Caro, S. (2023). Evaluation of the susceptibility to erosion of materials used as a base of rigid pavements using a vertical shaking table. *International Journal of Pavement Engineering*, 24(1), 2225118. <https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2225118>

Departamento Administrativo de la Defensoría del Espacio Público. (2023). *Reporte Técnico de Indicadores de Espacio Público de Bogotá*.

Dhakal, B., & Chopra, A. (2022). Use of building demolition waste as lime treated base course in bituminous road. *Materials Today: Proceedings*, 48, 1545–1552. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.463>

Federal Highway Administration. (2017). *Bases and Subbases for Concrete Pavement*.

Fedrigo, W., Núñez, W. P., Kleinert, T. R., Matuella, M. F., & Ceratti, J. A. P. (2017). Strength, shrinkage, erodibility and capillary flow characteristics of cement-treated recycled pavement materials. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(5), 393–402. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.06.001>

Halsted, G. E., Luhr, D. R., & Adaska, W. S. (2006). *Guide to Cement-Treated Base (CTB)*.

IDU, & Universidad de Los Andes. (2016). *Estudio de la Resistencia a la Erosión de materiales empleados como Bases en Pavimentos de Concreto Hidráulico, Fase II*.

Instituto de Desarrollo Urbano. (2018a). *Mejoramiento de Base y Subbase Granular con Cemento Hidráulico*. <https://www.zotero.org/pedrofarieta/items/NTX8B5FL/reader>

Instituto de Desarrollo Urbano. (2018b). *Mejoramiento de Base y Subbase Granular con Emulsión Asfáltica*. <https://www.zotero.org/pedrofarieta/items/NTX8B5FL/reader>

Instituto de Desarrollo Urbano. (2018c). *Subbase Granular para vías peatonales y ciclorutas con agregados naturales*. <https://www.zotero.org/pedrofarieta/items/NTX8B5FL/reader>

Instituto Nacional de Vías. (2013a). *Análisis Granulométrico de los Agregados Grueso y Fino*. INV E-213-13. <https://www.zotero.org/pedrofarieta/items/NTX8B5FL/reader>

Instituto Nacional de Vías. (2013b). *Determinación de la cantidad de material que pasa el tamiz de 75 μ m (No. 200) en los agregados pétreos mediante lavado*. INV E-214-13. <https://www.zotero.org/pedrofarieta/items/NTX8B5FL/reader>

Instituto Nacional de Vías. (2013c). *Humedecimiento y secado de mezclas compactadas de suelo-cemento* INV E-612-13. <https://www.zotero.org/pedrofarieta/items/NTX8B5FL/reader>

Instituto Nacional de Vías. (2013d). *Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento* INV E-614-13. <https://www.zotero.org/pedrofarieta/items/NTX8B5FL/reader>

	1. FORMATO - INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN 2. PARA LA ADOPCIÓN Y ADAPTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS MISIONALES	
	CÓDIGO: DMIC-FM-002	VERSIÓN: 1
	FECHA DE APLICACIÓN: NOVIEMBRE DE 2023	

L.E. Santaella-Valencia, & Salamanca-Correo, R. (2002). *Estado del arte del relleno fluido para subbases y bases granulares.pdf*.

ONU. (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development Preamble*.

UAERMV. (s/f). *¿Quiénes Somos?* <https://www.umv.gov.co/portal/quienes-somos-2/>

UAERMV. (2024). *Así se compone la malla vial, ciclorrutas y el espacio público de Bogotá*. <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/movilidad/asi-se-compone-la-malla-vial-y-el-espacio-publico-de-bogota>

White, M. P., Alcock, I., Grellier, J., Wheeler, B. W., Hartig, T., Warber, S. L., Bone, A., Depledge, M. H., & Fleming, L. E. (2019). Spending at least 120 minutes a week in nature is associated with good health and wellbeing. *Scientific Reports*, 9(1), 7730. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44097-3>

CONTROL DE GESTIÓN				
GESTIÓN	NOMBRE	CARGO / ROL	DEPENDENCIA	FIRMA
Elaboró:	Pedro Antonio Farieta Martínez	Contratista	Gerencia para el Desarrollo, la Calidad y la Innovación	
Revisó:	Franceth Justine Eduardo Castellanos Ballesteros	Profesional Especializado	Gerencia para el Desarrollo, la Calidad y la Innovación	
Revisó:	Jorge Alberto Ascencio Castañeda	Contratista	Gerencia para el Desarrollo, la Calidad y la Innovación	
Revisó:	Humberto Ramírez Gómez	Asesor	Dirección General	
Aprobó:	Camilo Enrique Marrugo Martínez	Gerente	Gerencia para el Desarrollo, la Calidad y la Innovación	

CONTROL DE MODIFICACIONES			
VERSIÓN	SECCIÓN MODIFICADA	FECHA DE MODIFICACIÓN	OBSERVACIONES
1			
2			
N			

El Documento 20241210293073 fue firmado electrónicamente por:	
JORGE ALBERTO ASCENCIO CASTAÑEDA	, GERENCIA PARA EL DESARROLLO LA CALIDAD Y LA INNOVACIÓN, ID: 1076659021, jorge.ascencio@umv.gov.co, Fecha de Firma: 13-12-2024 12:32:14
PEDRO ANTONIO FARIETA MARTINEZ	, GERENCIA PARA EL DESARROLLO LA CALIDAD Y LA INNOVACIÓN, ID: 1010220964, pedro.farieta@umv.gov.co, Fecha de Firma: 18-11-2024 08:47:31
CAMILO ENRIQUE MARRUGO MARTINEZ	Jefe de Oficina, GERENCIA PARA EL DESARROLLO LA CALIDAD Y LA INNOVACIÓN, ID: 1032387550, camilo.marrugo@umv.gov.co, Fecha de Firma: 13-12-2024 13:01:04
FRANCETH JUSTINE EDUARDO CASTELLANOS BALLESTEROS	Profesional especializado, GERENCIA PARA EL DESARROLLO LA CALIDAD Y LA INNOVACIÓN, ID: 1136884262, franceth.castellanos@umv.gov.co, Fecha de Firma: 13-12-2024 14:19:48
HUMBERTO RAMÍREZ GÓMEZ	Contratista, DIRECCIÓN GENERAL, ID: 19275301, humberto.ramirez@umv.gov.co, Fecha de Firma: 12-12-2024 23:26:47
 a7115971f686264906b0fd03b9ba174c32d92eb1dd04435246cd47ac708dd7d0 Codigo de Verificación CV: f7de5 Comprobar desde: https://www.umv.gov.co/portal/verificar/	