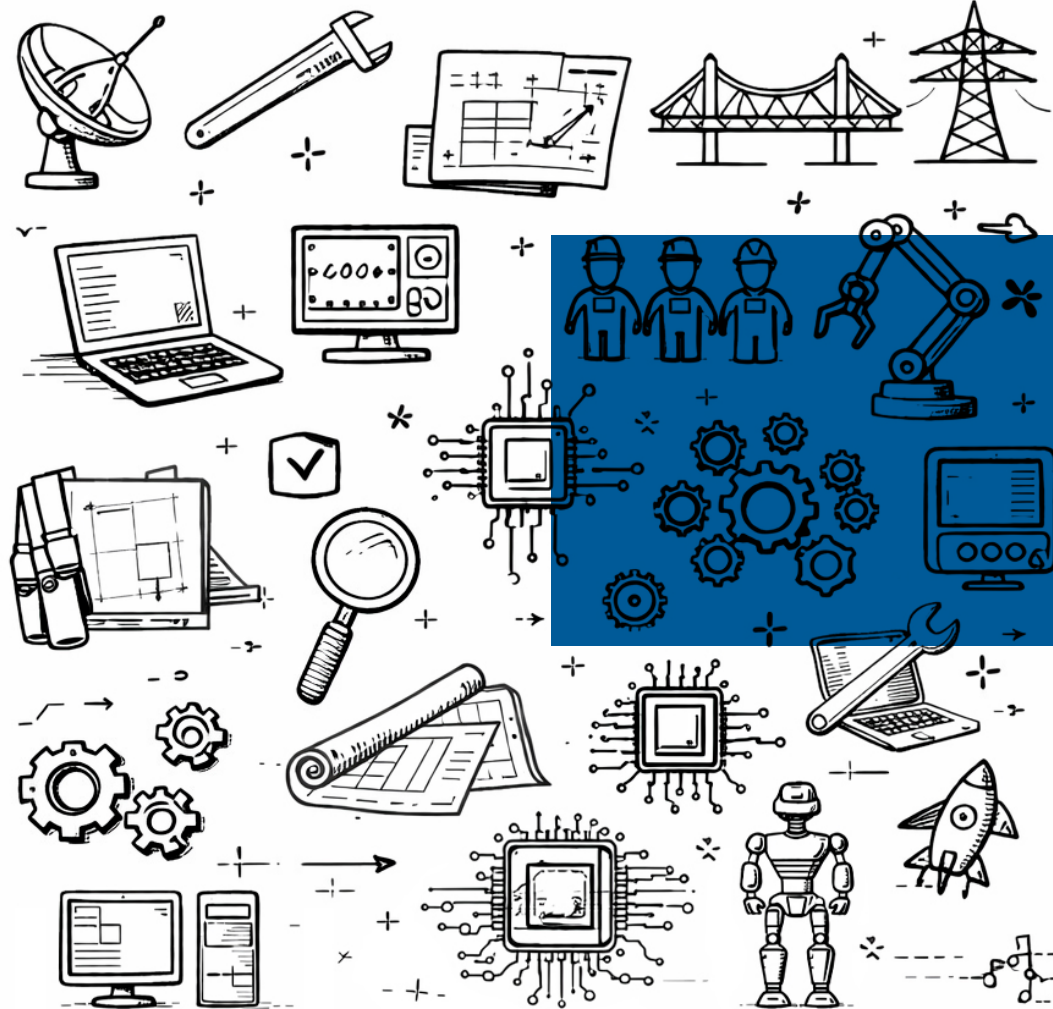




6

MODIFICACIÓN DE SUELOS SALINOS CON VIDRIO SOLUBLE PARA APLICACIONES EN CAPAS DE PAVIMENTO

MODIFICATION OF SALINE SOILS WITH SOLUBLE GLASS FOR PAVEMENT LAYER APPLICATIONS

¹³ Claudia Ximena Granados Muñoz

¹⁴ Juanita Acuña Esquivel

¹⁵ Daniel Bejarano Segura

¹⁶ Manuel Felipe López Vela

¹³ Magister en Gerencia de la Innovación en Proyectos, Universidad Cooperativa de Colombia, claudia.granadosm@campusucc.edu.co, <https://orcid.org/0009-0006-5044-8577>.

¹⁴ Estudiante de Ingeniería civil, Universidad Cooperativa de Colombia, juanita.acuna@campusucc.edu.co, https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001822947, <https://orcid.org/0009-0009-3519-9076>.

¹⁵ Doctor en Educación, Universidad Cooperativa de Colombia, daniel.bejaranose@campusucc.edu.co, https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001195247, <https://orcid.org/0000-0002-6898-8073>.

¹⁶ Especialista en Gestión de Proyectos para la Ingeniería, Universidad Cooperativa de Colombia, manuel.lopezv@ucc.edu.co, <https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/EnRecursoHumano/inicio.do>, <https://orcid.org/0009-0000-5879-9300>.

RESUMEN

Esta investigación evalúa si el material pétreo del río Upín, a la altura del municipio Restrepo, Meta, cumple con las propiedades requeridas para su uso en capas granulares de la estructura de pavimentos, tanto en su estado natural como mezclado con vidrio soluble (silicato de sodio). El objetivo fue caracterizar geotécnicamente el agregado mediante ensayos de laboratorio estandarizados según normas ASTM e INVIAS, enfocándose en parámetros de dureza, limpieza, resistencia del material y gradación. El análisis se basó en una metodología experimental que incluyó muestreo, caracterización física, química y mecánica mediante la comparación con especificaciones técnicas. Adicionalmente, se evaluó el efecto en la mezcla del suelo con tres dosificaciones de vidrio soluble (1%, 3% y 5%). Los resultados mostraron que, en su estado natural, el material no cumple con las especificaciones del INVIAS para bases y subbases debido a un bajo valor de CBR (19.36%), alta cantidad de partículas planas y alargadas, deficiencia en finos intermedios y contenido de terrones de arcilla superior al permitido.

Asimismo, la adición de vidrio soluble mejoró los parámetros de compactación, pero no incrementó la resistencia estructural; por el contrario, el CBR disminuyó con mayores dosis del aditivo. Este comportamiento indica que el material pétreo del río Upín no cumple con los requisitos técnicos necesarios para aplicaciones estructurales, ni en su estado natural ni con el tratamiento evaluado, lo que descarta su uso en capas granulares de pavimento.

PALABRAS CLAVE: estabilización de suelos, agregado pétreo, vidrio soluble, subbase granular, base granular.

¿Cómo citar este capítulo?

En APA: Granados, C., Acuña, J., Bejarano, D. y López, M. (2026). Modificación de suelos salinos con vidrio soluble para aplicaciones en capas de pavimento. En Bejarano-Díaz, D. y Guzmán-Brand, V. (Ed.). Ingeniería, ciencia y tecnología: perspectivas desde la investigación aplicada (pp. 111-124). Editorial TEINCO.

DOI del capítulo: <https://doi.org/10.64351/978-628-97363-5-9.cap.6>

ABSTRACT

This research evaluates whether the stone material from the Upín River, near the municipality of Restrepo, Meta, meets the properties required for use in granular layers of pavement structures, both in its natural state and mixed with soluble glass (sodium silicate). The objective was to geotechnically characterize the aggregate through standardized laboratory tests according to ASTM and INVIAS standards, focusing on parameters of hardness, cleanliness, material strength, and gradation. The analysis was based on an experimental methodology that included sampling and physical, chemical, and mechanical characterization through comparison with technical specifications. Additionally, the effect of mixing the soil with three doses of soluble glass (1%, 3% and 5%) was evaluated. The results showed that, in its natural state, the material does not meet INVIAS specifications for bases or sub-bases due to a low CBR value (19.36%), a high amount of flat and elongated particles, a deficiency in intermediate fines, and a clay lump content higher than allowed.

KEYWORDS: soil stabilization, stone aggregate, soluble glass, granular subbase, granular base.

How to cite this chapter?

In APA: Granados, C., Acuña, J., Bejarano, D. and López, M. (2026). Modificación de suelos salinos con vidrio soluble para aplicaciones en capas de pavimento. In Bejarano-Díaz, D. and Guzmán-Brand, V. (Ed.). Ingeniería, ciencia y tecnología: perspectivas desde la investigación aplicada (pp. 111-124). Editorial TEINCO.

Chapter DOI: <https://doi.org/10.64351/978-628-97363-5-9.cap.6>

INTRODUCCIÓN

La estabilización de suelos es utilizada como una estrategia para el mejoramiento de propiedades físicas, químicas y mecánicas de un material al mezclarlo con un agente estabilizante. Una de estas formas de estabilización es la química, donde se espera que la interacción entre el suelo y el compuesto logre que su comportamiento estructural mejore (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2008). Teniendo en cuenta lo anterior, la presente investigación pretende estabilizar el suelo de una zona local del departamento del Meta utilizando vidrio soluble, que posa como una alternativa de estabilización no convencional, la cual, según Mosquera (2011), modifica las características del suelo mediante reacciones químicas que le hacen más resistente.

El uso de materiales pétreos con alto contenido de cloruros es poco común, esto debido a aspectos como la falta de conocimiento del mismo y la poca experiencia en su manipulación, además de la inexistencia de normas y estándares para su utilización; lo cual frena los intentos por aprovecharlo en la construcción al marcar una preferencia por materiales tradicionales que han sido estudiados ampliamente. Así, este material se acumula en los lechos y riberas de los ríos, potencialmente reduciendo el área hidráulica y modificando el comportamiento de este.

En el caso particular de Restrepo (Meta), la acumulación del material de arrastre no explotado bajo los puentes disminuye el galíbo establecido en el diseño, pudiendo amenazar la estabilidad de la estructura en caso de crecientes. Además, no se encuentran estudios donde este suelo haya sido mezclado con vidrio soluble para mejorar sus características, de modo que se encuentra un vacío de conocimiento frente a si este compuesto químico contribuye al mejoramiento del comportamiento de los suelos al potenciar sus características de permeabilidad y resistencia de bases y subbases. Por tanto, surge la pregunta: ¿El material del río Upín, a la altura del municipio de Restrepo, Meta, cumple con las propiedades requeridas para su uso en bases y subbases granulares de infraestructura vial en su estado natural y mezclado con vidrio soluble?

A partir de lo anterior, la intención de utilizar el material del río Upín en Restrepo, Meta, nace de la necesidad de optimizar el aprovechamiento de los recursos locales. Por lo tanto, se decide no realizar únicamente la caracterización del comportamiento del suelo en estado natural, sino que se evalúan los cambios en sus propiedades al ser mezclado con un compuesto químico que según la revisión literaria ha dado buenos resultados en la densificación de suelos como es el vidrio soluble, para utilizarse en bases y subbases granulares. Con ello se busca diversificar los materiales empleados para estas capas de pavimento desde recursos aún sin explorar.

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Objetivo general

- Evaluar el comportamiento del material proveniente del río Upín en su estado natural y mezclado con vidrio soluble para su uso en bases y subbases granulares de la estructura de pavimento.

Objetivos específicos

- Realizar la caracterización física, química y mecánica del material granular en sus dos condiciones: estado natural y mezclado con vidrio soluble.
- Comparar las propiedades mecánicas del material pétreo en sus dos condiciones: estado natural y mezclado con vidrio soluble.

- Verificar el cumplimiento de la normatividad vigente expedida por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) de bases y subbases del material del río Upín en su estado natural y tratado químicamente.

Hipótesis

Dentro del desarrollo de la presente investigación se plantean 2 hipótesis para el desarrollo de la misma, asimismo, cada una de ellas está acompañada de una hipótesis nula.

- **Hipótesis de investigación 1 (H_1).** El suelo salino puede utilizarse como material de base o subbase para pavimentos.
- **Hipótesis nula 1 (H_{01}).** El suelo salino no puede utilizarse como material de base o subbase para pavimentos.
- **Hipótesis de investigación 2 (H_2).** El vidrio soluble mejora las propiedades de compactación del suelo salino.
- **Hipótesis nula 2 (H_{02}).** El vidrio soluble no mejora las propiedades de compactación del suelo salino.

MARCO CONCEPTUAL O TEÓRICO

Pavimento flexible

Se define como una estructura vial compuesta por capas granulares, pensado para distribuir las cargas de tráfico hacia el terreno subyacente sin causar deformaciones excesivas (Reyes & Rondón, 2015). Las capas son colocadas de forma sucesiva sobre la superficie del terreno natural y son compactadas para garantizar estabilidad, resistencia y durabilidad.

Estructura de pavimento flexible

El pavimento flexible se compone por una capa de rodadura que se apoya en capas de materiales granulares competentes (León et al., 2009).

Carpeta asfáltica. También llamada capa de rodadura se compone por agregados y asfalto y, sus funciones principales son la protección de la estructura del pavimento al impermeabilizar la superficie y proporcionar confort al usuario de la vía. Es la capa que recibe directamente las cargas vehiculares, por lo que debe ser resistente a la abrasión (Garzón & Hernández, 2018).

Base granular. Ubicada directamente debajo de la carpeta asfáltica, esta capa se encarga de soportar las cargas del tráfico transmitidas desde la superficie y distribuir las hacia las capas inferiores. Los agregados empleados deben cumplir con los requisitos de calidad establecidos por el Instituto Nacional de Vías (2022), según lo estipulado en el Artículo 330-22.

Subbase granular. Esta capa posee una composición de agregados que facilita el drenaje, permitiendo transportar el agua hacia los laterales del pavimento. Asimismo, la subbase transmite las cargas al terreno y debe cumplir con las especificaciones establecidas por el Instituto Nacional de Vías (2022), según lo indicado en el Artículo 320-22.

Subrasante. Es la capa inferior y más baja de la estructura del pavimento, correspondiente al terreno natural. Suele estar compuesta por el suelo existente en el lugar, por lo que en ocasiones sus características geotécnicas no son adecuadas,

momento en que es necesario mejorar sus propiedades a través de procesos de estabilización, conocidos como mejoramiento de subrasante.

Estabilización de suelos

Es aquel proceso por el cual las propiedades físicas, químicas y mecánicas de un material se estabilizan mediante la adición de un compuesto. Este proceso comienza con la clasificación del material mediante ensayos de laboratorio, luego de esta caracterización se elige el estabilizante apropiado según las variaciones que se pretenden lograr, ya sea resistencia mecánica, permeabilidad, o durabilidad, o cualquier otra y se determina su dosificación mediante ensayos de mezcla (Garnica et al., 2002).

Estabilización de suelos con productos químicos no tradicionales

Para realizar este procedimiento deben garantizarse parámetros mínimos que aseguren aplicabilidad y estabilidad a lo largo del tiempo. Esta clase de estabilizantes se divide en emulsiones enzimáticas, materiales puzolánicos, polímeros y organosilanos, sales inorgánicas y aceites sulfonados y sales orgánicas (Instituto Nacional de Vías, 2022). Al no estar caracterizado en su totalidad el comportamiento de estos materiales en el suelo es necesario el proceso ya descrito para definir sus efectos (Instituto Nacional de Vías, 2022).

Sales inorgánicas. Compuestos químicos de naturaleza iónica que se emplean para controlar la emisión de polvo en vías no pavimentadas y reducir la plasticidad de los suelos (Instituto Nacional de Vías, 2022).

Estabilización de suelo con silicato de sodio (Na_2SiO_3)

Este compuesto ha sido utilizado en la estabilización de suelos desde hace cerca de 80 años. Se ha comprobado que este compuesto funciona particularmente cuando el suelo es rico en sales de calcio disueltas en agua, que reaccionan con el silicato y forman geles de silicato cálcico. Dichos geles se hidratan y actúan como agente cementante natural que insta a la cohesión entre las partículas del suelo, mejorando su resistencia mecánica (Garnica et al., 2002).

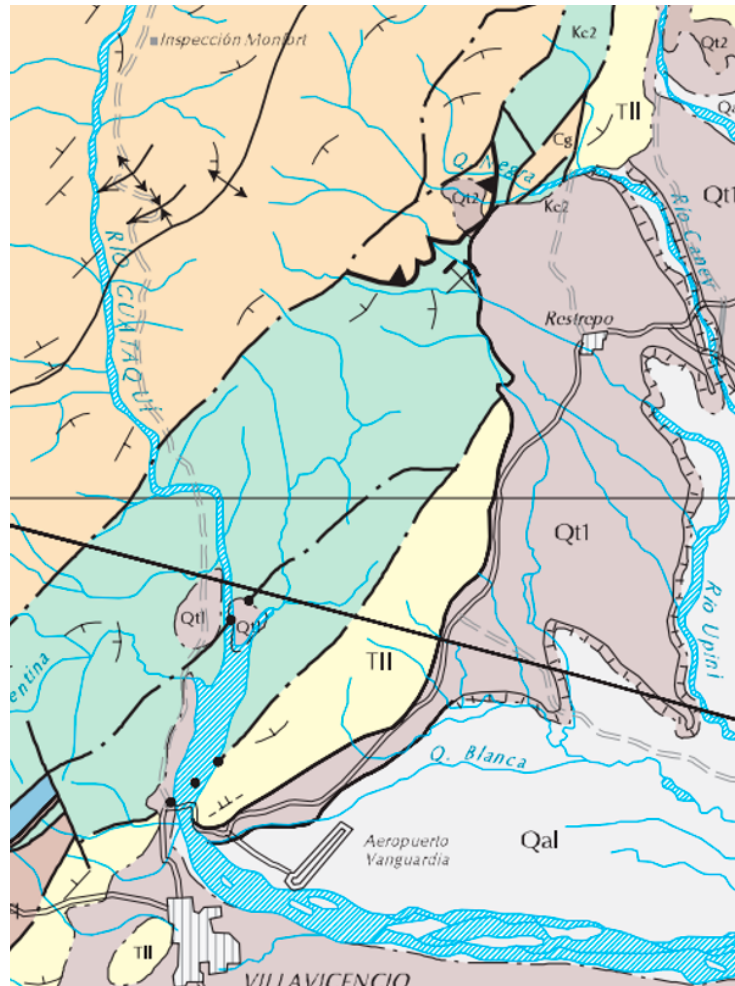
Esta combinación entre el suelo y el silicato de sodio principalmente aumenta la permanencia de agua durante el proceso de compactación, facilitando el alcance de densidades mayores, una resistencia y rigidez más altas, y una permeabilidad menor en suelos granulares (Fink, 2012).

MARCO GEOGRÁFICO

Geología local

La información geológica utilizada se basa en la plancha 247 Cáqueza, escala 1:100.000, elaborada por el Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS, 2011). Dentro del área cubierta por esta plancha se localiza la zona de estudio, correspondiente a la cuenca del río Upín, lo que permite identificar con detalle las unidades litológicas presentes y las estructuras geológicas (como fallas y contactos entre formaciones).

Figura 35. Geología local cuenca del río Upín y las principales fallas geológicas



Nota. Tomado de Geología del cuadrángulo L-11 Villavicencio por Ministerio de Minas y Petróleos (2003).

La Figura 35, correspondiente a la plancha 247 Cáqueza, muestra que la cuenca del río Upín se ubica sobre rocas sedimentarias que abarcan desde el Paleozoico hasta depósitos cuaternarios, limitadas por fallas normales que condicionan la discordancia entre unidades litográficas como la Formación Lutitas de Macanal y las areniscas de la Formación Capas Rojas del Guatiquía.

Litoestratigrafía. A partir de la representación cartográfica, se describe la litografía identificada en la cuenca y las unidades aflorantes en el área de estudio:

- **Formación capas rojas del Guatiquía (DCcg).** La Formación Capas Rojas del Guatiquía se localiza al norte del área de estudio y se caracteriza por su coloración rojiza dado a la exposición y meteorización, que se da por la liberación de hierro de los minerales primarios y posterior oxidación (Flórez, 2021). Esta unidad es la más antigua que afloró en la cuenca alta del río Upín y hace parte del Grupo Farallones, originándose en la edad del Paleozoico.

Está conformada por intercaladas de areniscas cuarzosas y limolitas rojas con algunos niveles calcáreos (Pulido y Gómez, 2001). De acuerdo con la descripción litológica presentan un desarrollo de foliación y un alto grado de fracturación.

- **Formación lutitas de Macanal (K1m).** Esta formación aflora en la cuenca alta del río Upín y hace parte del Grupo Cáqueza. En general, la Formación Lutitas de Macanal, definida por Ulloa (2000), consiste principalmente de lutitas negras carbonosas con intercalaciones de areniscas cuarcíticas, arcillas esquistosas y un conglomerado cuarcítico.

Sobre el área de estudio del río Upín afloran extensamente capas delgadas de lodolitas negras calcáreas, ligeramente carbonosas y niveles ricos en restos de plantas, amonitas y bivalvos, como se identifica en la Figura 36. Esta unidad se presenta en contacto fallido con la Formación Capas Rojas del Guatiquía, en cuanto a la edad, diferentes autores han establecido el Paleozoico Superior.

Figura 36. Afloramiento formación lutitas de Macanal



Nota. Lodolitas negras calcáreas. Tomado de Ulloa, G (2000).

- **Depósitos aluviales recientes (Qal).** Los depósitos cuaternarios de origen aluvial se crean por avenidas en ríos y quebradas de material que se desplaza por las zonas de valle de las fuentes hídricas, rellenando estas depresiones en grandes extensiones. Esta unidad se forma principalmente por la sedimentación continua del río Upín, cuya composición litológica se caracteriza por la presencia de gravas, guijos y cantos en una matriz areno-lodosa, provenientes de la erosión asociada a la tectónica activa en las fallas del piedemonte llanero (INGEOMINAS, 2001).

Geología estructural

El área de estudio se localiza en el piedemonte de la Cordillera Oriental, que es considerada zona de actividad tectónica correspondiente al Sistema de Fallas del Borde Llanero, considerado como uno de los más importantes del norte de los Andes gracias a su movilidad en lapsos temporales recientes, pues la deformación de la corteza ha ocurrido en los últimos

2,5 millones de años (Muñoz et al., 2015). En este contexto, existen dos sistemas de fallas principales que conforman el marco tectónico estructural:

- **Falla de Servitá.** Es una estructura con dirección Norte-Este que pone en contacto rocas del Paleozoico de las Capas Rojas del Guatiquía con rocas del Cretácico como las Lutitas de Macanal. Por efectos de gravedad produce deslizamientos de rocas como se observa en la cuenca alta del río Upín (INGEOMINAS, 2011).
- **Falla de Upín.** Esta falla se considera subsidiaria de la Falla Servitá con dirección Norte-Este; la falla presenta cabalgamiento que genera fractura y erosión de las unidades litológicas, controlando parcialmente la disposición, relieve y la dinámica de la cuenca del río Upín.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de la investigación se eligió un enfoque mixto, llevando a cabo análisis de variables cuantitativas y cualitativas desde el diseño experimental. Para ello, se consideraron las siguientes variables:

- Variable independiente: material del río Upín a la altura del municipio de Restrepo, Meta.
- Variable dependiente: índice de resistencia del material de base y subbase.
- Variable interviniente: composición del suelo en el lugar de recolección de muestras.
- Variable controlada: porcentaje de vidrio soluble.

Mediante ensayos de laboratorio se llevó a cabo la caracterización del agregado que se da al utilizar alguna de las variables tanto en estado natural como mezclado con vidrio soluble, evaluando su resistencia y durabilidad. Además, las normas ASTM se utilizan como fuente de información principal para la caracterización de agregados, mientras las normas INVIAS se utilizan para verificar el cumplimiento de los parámetros para bases y subbases granulares. Adicionalmente, se extrajo información de guías, manuales, artículos y productos de investigación pertinentes al tema.

Fases de la investigación

La primera fase de la investigación consistió en la revisión literaria de artículos, trabajos de grado, guías e informes, de orden local, nacional e internacional, con relación a la aplicación de vidrio soluble en agregados pétreos. Aspecto que dio lugar a la segunda fase, consistente en la recolección del material del río Upín a la altura del municipio de Restrepo, Meta, requerido para realizar los ensayos de laboratorio para ser caracterizado bajo la normatividad vigente. En este momento se garantizaron condiciones óptimas de almacenamiento del material para minimizar la segregación, degradación, y la contaminación con sustancias deletéreas.

Durante la tercera fase se realizaron ensayos de caracterización de los materiales, tales como la caracterización fisicoquímica de los materiales en estado natural y al mezclarse con vidrio soluble, llevados a cabo siguiendo las normas ASTM D 4972, ASTM D 2419, ASTM C 128, ASTM C 127, ASTM D 422, ASTM D 698, ASTM D 854, ASTM D 1883, ASTM C 131, ASTM C 142, ASTM D 4791. Como cuarta fase se dio la determinación de los porcentajes de uso de vidrio soluble según revisión literaria y resultados de los ensayos de la fase 3. Posteriormente se realiza la mezcla del suelo salino con el vidrio soluble en 1%, 3% y 5% y se repiten los ensayos previamente relacionados.

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos realizados al material pétreo en estado natural y con diferentes porcentajes de vidrio soluble, se realiza, en la quinta fase, un análisis comparativo para identificar cuál de los tres porcentajes proporciona un mejor comportamiento en las propiedades físicas y mecánicas. Finalmente, se realizan las conclusiones y recomendaciones sobre el uso de este tipo de suelo.

Procedimientos

Los procedimientos realizados se clasifican de la siguiente forma:

1. Caracterización del material pétreo:
 - Inspección de campo.
2. Propiedades físicas:
 - Gravedad específica.
 - Granulometría.
 - Densidad y absorción de agregados gruesos.
 - Densidad y absorción de agregados finos.
 - Equivalente de arena.
 - Terrones de arcilla y partículas deleznales.
 - Partículas planas, alargadas o planas y alargadas.
 - Conductividad eléctrica.
3. Propiedades mecánicas:
 - Resistencia al desgaste.
 - Compactación.
 - CBR.
4. Propiedades químicas:
 - pH.
 - Salinidad.

HALLAZGOS O RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados al material pétreo del río Upín, en estado natural y con 1%, 3% y 5% de silicato de sodio.

Suelo en estado natural

Los resultados de los ensayos de laboratorio se comparan con las especificaciones establecidas por el INVIAS para materiales de base y subbase granular, para determinar si cumple con los requisitos técnicos mínimos para uso en pavimentos. Aunque la gravedad específica no es una propiedad sujeta a requisitos específicos en las normas del

INVIAS para capas de pavimento, constituye un dato fundamental en la caracterización geotécnica del agregado, su resultado fue 2,79.

Al determinar el tamaño y la distribución granulométrica de las partículas del suelo y compararlos con los límites de gradación establecidos en el Artículo 320, Subbase granular del INVIAS para las especificaciones SBG-50 y SBG-38, se identifica que el material presenta una gradación globalmente aceptable, cumpliendo con los rangos exigidos para la mayoría de las fracciones granulométricas, especialmente ajustándose a los requisitos de la SBG-50.

Sin embargo, el porcentaje del material que pasa por el tamiz No. 10 (2.00mm) no cumple el límite inferior permitido, por lo que se infiere que tiene una carga de finos ligeramente menor a la requerida. De igual forma, se compara con los límites establecidos para la subbase tipo SBG-38 y se observa que el material presenta dos fracciones por debajo del rango mínimo permitido, específicamente para el tamiz No. 4 (4.75mm) y No. 10 (2.00mm).

Por otra parte, el material fue evaluado frente a las diferentes especificaciones de base granular (BG) establecidas en el Artículo 330 del INVIAS, entre las cuales se encuentran las bases granulares de gradación gruesa BG-40 y BG-27, y las bases granulares de gradación fina BG-38 y BG-27. Al comparar la curva granulométrica del agregado, se obtuvo que presenta una mayor compatibilidad con la especificación BG-40.

El sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS permite clasificar los suelos granulares según el porcentaje retenido en el tamiz No. 4 (> 4.75 mm) para determinar si el suelo granular es una grava (G) o una arena (S), se obtuvo que más del 50% del material es retenido en la malla No. 4 (4.75 mm). Lo anterior indica que el agregado está compuesto predominantemente por partículas de tamaño grueso, este resultado permite clasificar al material como un suelo granular de grava G.

De igual forma, el suelo fue clasificado según el Sistema AASHTO de la *American Association of State Highway and Transportation Officials*, utilizando los resultados de granulometría y de acuerdo con la norma I.N.V. E-180. Este análisis indica que el material pertenece al grupo A-1, específicamente dentro de los subgrupos A-1-a o A-1-b, lo cual lo define como un suelo granular bien graduado.

La resistencia a la abrasión en la máquina de Los Ángeles es un requisito exigido tanto para bases como para subbases granulares, aunque con rangos de aceptación diferentes según el tipo de capa. Sin embargo, cuando se compara con los requisitos más exigentes aplicables a bases granulares (BG), el material no cumple con ninguna de las especificaciones, pese a que el agregado pétreo del río Upín presenta un comportamiento adecuado para ser utilizado como subbase granular.

Asimismo, se determinó la humedad óptima para la compactación del material mediante el ensayo de Proctor estándar, aspecto que indica que la humedad óptima para el agregado pétreo del río Upín es del 9.8%, valor en el cual se alcanza la máxima densidad seca. A partir de esta humedad óptima, se evaluó la capacidad de soporte del suelo utilizando el ensayo de CBR (*California Bearing Ratio*) mediante la relación entre el esfuerzo y la deformación en diferentes estados de compactación. Al evaluar el valor obtenido de 19.36% frente a las diferentes categorías establecidas en los Artículos 330 (Bases granulares) y 320 (Subbases granulares), se observa que el material no cumple con ninguna de las especificaciones.

Por otra parte, el equivalente de arena constituye un indicador de la limpieza del agregado y de la cantidad relativa de material arcilloso o limo presente en una muestra de suelo, el ensayo arrojó un equivalente de arena de 75% lo que indica una alta presencia de arena limpia y un contenido bajo de finos plásticos, se concluye que el material cumple ampliamente con la normativa.

El contenido de terrones de arcilla y partículas deleznable mide la cantidad de material que puede desintegrarse al estar expuesto a la humedad, para esto el valor obtenido fue 7.62%, a partir de lo cual se determina que el material no cumple con ninguna de las categorías permitidas. El material analizado demostró ser coherente entre las observaciones realizadas en la visita de campo y los resultados obtenidos en laboratorio, esto evidenció una alta proporción de partículas planas y alargadas, característica que fue confirmada mediante el ensayo de partículas planas y alargadas, cuyos resultados indicaron un porcentaje superior al límite máximo permitido por la normativa INVIAS para bases granulares.

Se evaluó el potencial de hidrógeno (pH) mediante dos métodos, obteniéndose un valor aproximadamente de 3, lo que se encuentra en un rango altamente ácido, que puede estar asociado a la presencia de minerales sulfurados, especialmente pirita de la Formación Lutitas de Macanal y los minerales de hierro de la Formación Capas Rojas del Guatiquía.

El análisis de agua realizado al cauce del río Upín arrojó un pH de 7.12, este resultado sugiere que el sistema fluvial mantiene una química acuosa estable y compatible con usos múltiples, incluyendo riego, vida acuática y construcción. A su vez, la absorción de los agregados fino y grueso no son un requisito de aceptación directo en las especificaciones del INVIAS para materiales utilizados en capas de base y subbase granular, sin embargo, su determinación es fundamental por razones prácticas y técnicas.

Ahora bien, la constante de permeabilidad indica una “alta permeabilidad” lo que es consistente con su naturaleza granular, ya que los suelos arenosos suelen poseer poros interconectados de tamaño suficiente para permitir un flujo relativamente rápido del agua. La prueba de permeabilidad se realizó sobre la fracción fina del agregado, es decir, el material que pasa el tamiz No. 10.

La conductividad eléctrica (CE) medida en el suelo en estado natural fue de 0.96 dS/m, mientras que la del agua superficial del río Upín fue de 0.38 dS/m, estos valores indican que el suelo y el agua no presentan condiciones de salinidad significativa, ya que ambos se encuentran por debajo del límite de 4 dS/m que define un suelo salino (Brusseau et al., 2019).

Suelo mezclado con vidrio soluble

Los análisis se centraron especialmente en las propiedades de la fracción fina, ya que es en esta donde se espera una mejora significativa en parámetros como la resistencia mecánica, compactación y estabilidad estructural. Respecto a los parámetros de compactación donde se relaciona la humedad óptima y densidad seca, se observó que ambos parámetros aumentan progresivamente a medida que se incrementa el porcentaje de silicato de sodio añadido al material (1%, 3% y 5%), esto indica que influye favorablemente en la capacidad del agregado fino para retener agua y lograr una mayor densificación durante el proceso de compactación, el aumento en la humedad óptima sugiere que mejora la cohesión entre partículas, requiriendo una mayor cantidad de agua.

A pesar de que la adición de silicato de sodio mejoró significativamente los parámetros de compactación, este beneficio no se reflejó en el valor de CBR, parte del agua adicionada queda fuertemente retenida en los geles de silicato formados, sin contribuir al contacto efectivo friccionante entre partículas lo que genera una matriz más blanda y deformable explicando la disminución en el valor del CBR.

A medida que se incrementó el porcentaje de silicato de sodio, se observó una disminución progresiva del equivalente de arena (EA), por la formación de geles superficiales que actúan como recubrimiento sobre las partículas, dificultando su desintegración durante el ensayo. La absorción del material aumentó con la adición de silicato de sodio, lo cual es coherente con los resultados obtenidos en el ensayo de compactación. Este incremento es esperado, ya que el silicato favorece la

formación de geles húmedos en la fracción fina, lo que aumenta la capacidad del agregado para absorber y retener agua en sus poros.

El tratamiento con silicato de sodio generó un cambio significativo en el pH del material, pasando de un valor ácido ($\text{pH} = 3$) en estado natural a un entorno claramente alcalino ($\text{pH} > 9$) después de la adición del compuesto. Este cambio es coherente porque el silicato de sodio es una sustancia alcalina que cuando se disuelve en agua forma una solución alcalina.

Los resultados de permeabilidad indican un aumento progresivo a medida que se incrementa la incorporación de vidrio soluble, con valores de 2.80×10^{-3} , 2.90×10^{-3} y 3.82×10^{-3} cm/s para los porcentajes de 1%, 3% y 5% de silicato de sodio respectivamente, este comportamiento sugiere que, aunque promueve cierta cohesión entre partículas finas, no genera una red cementante densa ni reduce eficazmente los poros interconectados.

La adición de silicato de sodio al material pétreo del río Upín generó un aumento progresivo de la conductividad eléctrica, alcanzando valores de hasta 6 dS/m, lo cual indica un incremento considerable en la concentración de iones disueltos en el medio poroso, resultado que clasifica como un suelo moderadamente salino (Brusseau et al., 2019). Las sales disueltas en el agua del río Upín fueron 248 mg/L, indica una baja cantidad de estas sales; esto debido a que las clasificaciones internacionales indican agua dulce, pese a la presencia de formaciones geológicas potencialmente solubles en las cercanías (como el domo de sal), el cauce no presenta acumulación significativa de sales, probablemente debido al alto régimen pluvial y al constante transporte fluvial.

CONCLUSIONES

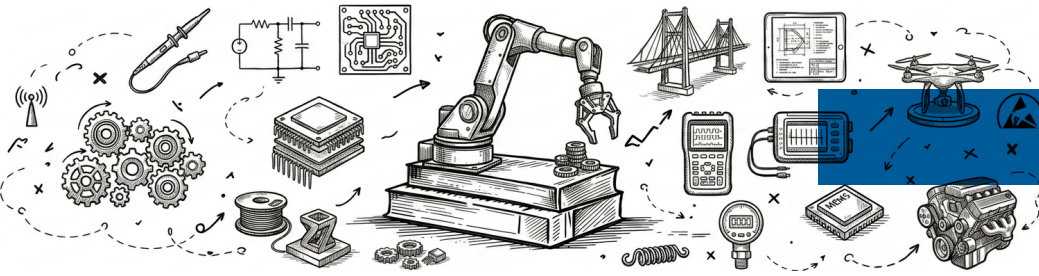
La cuenca alta del río Upín presenta condiciones naturales extremas, particularmente lluvias torrenciales, topografía escarpada y alta actividad tectónica, lo que contribuye significativamente a la inestabilidad de las laderas y al debilitamiento de las capas superficiales del suelo. Estas condiciones se suman a la presencia de formaciones geológicas altamente fracturadas como las Lutitas de Macanal y la Formación Capas Rojas del Guatiquía, que facilitan la erosión y transporte de material, lo que las convierte en fuente importante de sedimento en el cauce del río. Este proceso de liberación y movilización de detritos alimenta el lecho fluvial, aumentando el riesgo de colmatación y afectando la dinámica sedimentaria de toda la cuenca.

Según los parámetros dictaminados por la normatividad del INVIAS 2022 el material del río Upín, en su estado natural, no cuenta con las propiedades suficientes para cumplir con las especificaciones exigidas para bases y subbases granulares, descartando su explotación con el fin de mitigar el proceso de colmatación del río y ser una fuente alternativa para las tradicionales altamente explotadas. Deficiencias como un bajo valor de CBR (19.36%), alta cantidad de partículas planas y alargadas y el contenido de terrones de arcilla superior al permitido, determinan que su calidad estructural es baja, por lo que no es recomendable su uso directo en infraestructura vial sin tratamiento previo.

Aunado a esto, la adición de vidrio soluble (silicato de sodio) en los porcentajes evaluados (1%, 3% y 5%) no generó mejoras significativas en las propiedades mecánicas, y en algunos casos, como el CBR, se observó un deterioro progresivo con el aumento del aditivo, por lo que su utilización fue en detrimento del desempeño. Este comportamiento sugiere que, bajo las condiciones de este estudio, el silicato de sodio no actúa como un estabilizante efectivo para este tipo de agregado, posiblemente debido a la naturaleza de los finos, la falta de curado óptimo o la formación de geles frágiles.

REFERI

- 126



REFERENCIAS

- Reyes, F. A., & Rondón, H. A. (2015). *Pavimentos: materiales, construcción y diseño*. Ecoe Ediciones.
- Ulloa, G. (2000). *Formación Lutitas de Macanal*. Ministerio de Minas y Energía.