

CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE VÍAS EN AFIRMADO ESTABILIZADAS CON CLORURO DE CALCIO

CONSIDERATIONS FOR DESIGN AND CONSTRUCTION OF GRAVEL SURFACED ROADS STABILIZED WITH CALCIUM CHLORIDE

ARMANDO OROBIO

Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Colombia, aorobioq@univalle.edu.co

Recibido para revisar agosto 24 de 2009, aceptado marzo 2 de 2010, versión final abril 23 de 2010

RESUMEN: El sector agroindustrial en algunas regiones de Colombia utiliza trenes cañeros que circulan sobre vías en afirmado como parte de su proceso de producción industrial. La conservación de estas vías y la mitigación de las emisiones de polvo producidas por los vehículos que circulan por este tipo de vías son de interés para este sector de la industria. La estabilización de vías en afirmado con cloruro de calcio fue analizada en un tramo de prueba y el resultado indicó que esta alternativa es eficaz para la mitigación de las emisiones de polvo en las vías de este sector industrial. Sin embargo, la durabilidad del afirmado resultó ser un factor crítico en la efectividad de este tipo de control de emisiones de polvo. Este artículo presenta algunas recomendaciones para el diseño y construcción de vías estabilizadas con cloruro de calcio, estas recomendaciones están orientadas a mejorar la efectividad de la estabilización en la mitigación de las emisiones de polvo y mejorar la su durabilidad reduciendo así las inversiones en mantenimiento de las vías.

PALABRAS CLAVE: vías en afirmado, mitigación de polvo, cloruro de calcio, estabilización de suelos.

ABSTRACT: The agribusiness sector utilizes sugar trains in some regions of Colombia. These vehicles travel on gravel surfaced roads as a part of the production process. Road maintenance and dust suppression have become an important factor for these industries. Stabilization of gravel surfaced roads with calcium chloride was analyzed on a test section. Calcium chloride proved to be an efficient dust suppressant to be used in those regions. However, the performance of the gravel surfaced roads resulted to be a critical factor in controlling dust emissions. This paper presents some recommendations for the design and construction of gravel surfaced roads stabilized with calcium chloride. These recommendations are addressed to improve the effectiveness of stabilizations as a dust suppressant means and to improve the performance of the roads to reduce investment in maintenance.

KEYWORDS: gravel surfaced roads, dust suppressant, calcium chloride, soil stabilization.

1. INTRODUCCIÓN

El sector agroindustrial colombiano soporta sus procesos de producción sobre vías en afirmado en varias regiones del país y la utiliza grandes vehículos especializados para el transporte de productos agrícolas o materias primas. Este es el caso de los ingenios azucareros que utilizan trenes cañeros en sus procesos productivos

(Figura1). Dos de los principales problemas que se presentan en este tipo de actividad industrial son las emisiones de polvo generadas por los vehículos que circulan por este tipo de superficie de rodadura y la conservación de las vías que debido al gran peso de los vehículos se deterioran de manera rápida. La severidad de las emisiones de polvo está relacionada con el volumen de tráfico, la resistencia a la abrasión del material de afirmado y las características de

los vehículos como el número de ejes, la velocidad y el peso [1]. El clima de la región también es un factor importante porque la pluviosidad disminuye las emisiones de polvo pero contribuye al deterioro de las vías. La presencia de humedad en el material de afirmado elimina la emisión de polvo. De hecho, el esparcimiento de agua es una de las medidas más ampliamente utilizadas como mitigador de emisiones de polvo [2]. El esparcimiento de agua es el método más utilizado en el sector de los ingenios azucareros en el departamento del Valle del Cauca, pero es poco efectivo porque las condiciones climáticas de la región hacen que el agua se evapore rápidamente y se requieran de frecuentes aplicaciones para mantener el efecto.



Figura 1. Tren cañero
Figure 1. Sugar train

Se realizó un estudio para analizar la efectividad del cloruro de calcio en la estabilización de afirmados en vías del sector agroindustrial en Colombia. En el estudio, desarrollado en vías transitadas principalmente por trenes cañeros, se comparó durante 6 meses las emisiones de polvo de un tramo de prueba estabilizado con cloruro de calcio y otro de las mismas características sin estabilizar. El proceso constructivo involucró escarificación del afirmado existente, aplicación del cloruro de calcio, conformación de la superficie y compactación.

Las mediciones de polvo se realizaron con colectores de polvo consistentes con la norma ASTM-D1739-98 [3]. El material utilizado para la construcción de los tramos cumplía con las

especificaciones colombianas para material de afirmado [4].

El estudio demostró una alta efectividad del cloruro de calcio como agente mitigador de emisiones de polvo en este tipo de vías y con este tipo de tránsito [5]. La Figura 2 presenta en escala logarítmica los resultados de las mediciones con los colectores de polvo. Durante los primeros 5 meses de la estabilización, la diferencia en emisiones de polvo entre el tramo estabilizado y el tramo control, se mantuvo cercana al 99.9%. Después del quinto mes la estabilización disminuyó su potencial como mitigador de polvo, sin embargo la diferencia en emisiones de polvo entre los dos tramos a los 6 meses era de 82.1%.

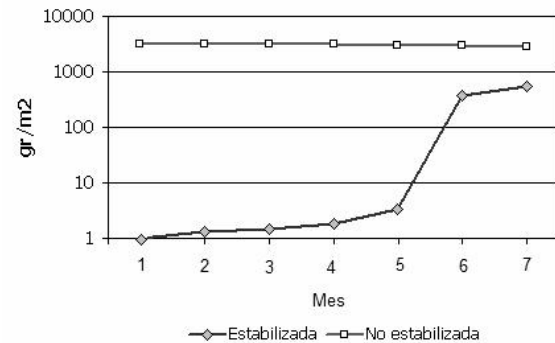


Figura 2. Mediciones de las emisiones de polvo
Figure 2. Dust emissions measurements

El estudio también demostró que la durabilidad de la estabilización tiene un alto impacto en la duración del efecto del cloruro de calcio como mitigador del polvo. El deterioro de la vía hace que el efecto del cloruro del calcio se pierda. Los principales deterioros reportados en la investigación fueron pérdida superficial de agregado, ahuellamiento y baches [5,6]. Aunque la efectividad de la estabilización quedó demostrada en este estudio, varios interrogantes referente al diseño y construcción fueron identificados.

Este artículo presenta consideraciones para diseño y construcción de estabilizaciones de vías en afirmado con cloruro de calcio. En lo referente al diseño de la estabilización, se presentan recomendaciones para determinar el contenido adecuado de cloruro de calcio acorde

con las características del material a ser usado en la construcción. Se consideran las características especiales del tránsito de trenes cañeros en la determinación del espesor de la capa de la estabilización. En lo referente a la construcción se plantea el procedimiento constructivo y recomendaciones para la durabilidad de la estabilización.

2. DISEÑO DE LA ESTABILIZACIÓN DE AFIRMADO

El diseño de la estabilización se refiere a la determinación del porcentaje óptimo de cloruro de calcio y a la determinación del espesor de la capa de afirmado estabilizado. La determinación del porcentaje óptimo debe direccionarse no sólo hacia el control de emisiones de polvo sino también a la durabilidad de la estabilización [6,7]. No existe un procedimiento estandarizado para la determinación del porcentaje óptimo de cloruro de calcio, algunos estudios han realizado ensayos de CBR o de compresión incofinada para estudiar el comportamiento mecánico de este tipo de estabilizaciones [6,8,9,10].

2.1. Determinación del porcentaje óptimo de cloruro de calcio

Las características de los materiales de afirmado son tan variables que el porcentaje de cloruro de calcio requerido para la estabilización puede variar dependiendo del material [11]. El porcentaje óptimo se puede determinar mediante ensayos de CBR, se recomienda hacer el análisis con CBR saturado y no saturado, se pueden utilizar varios porcentajes entre 0.5% y 2.5 % en peso seco del material como base inicial para encontrar el porcentaje óptimo en laboratorio. El porcentaje con mayor valor de CBR garantizará la mitigación de polvo y presentará el mejor comportamiento estructural debido a que generalmente se requiere mayor porcentaje de cloruro de calcio para estabilización estructural del afirmado que para la mitigación de polvo [12]. La Figura 3 muestra el comportamiento

del CBR no saturado en el material de afirmado utilizado en la construcción del tramo de prueba [5, 12]. El valor de 0% de cloruro de calcio fue incluido como una referencia del material sin estabilizar. En la figura, el porcentaje óptimo de cloruro de calcio es de 1.4% en peso seco del material, porcentajes mayores del 1.8 % disminuyen el valor del CBR incluso por debajo del valor inicial sin estabilizar. La capacidad higroscópica del cloruro de calcio hace que éste retenga más agua durante la compactación por lo que el valor CBR disminuye [13]. Esta característica es importante resaltarla porque la aplicación de demasiado cloruro de calcio afectaría la durabilidad de la vía.

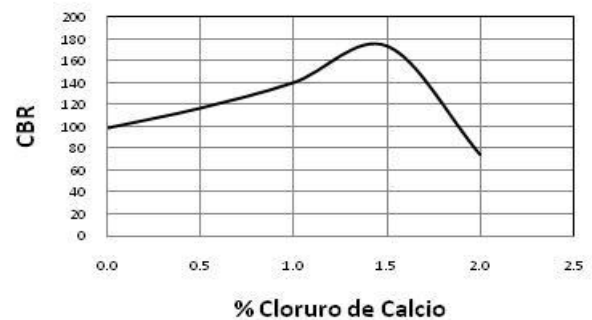


Figura 3. Variación del CBR con el porcentaje de cloruro de calcio

Figure 3. Variation of CBR with the percent of calcium chloride

2.2. Características del material de afirmado

Es importante considerar que la efectividad y el porcentaje óptimo de cloruro de calcio pueden variar dependiendo de las características del material a estabilizar [14]. Por lo tanto deben realizarse ensayos de laboratorio para determinar las características del material. Estos ensayos de laboratorio incluyen granulometría, límites de Atterberg y plasticidad. Para garantizar la durabilidad de la estabilización se requiere que el material a utilizar cumpla con las especificaciones técnicas para afirmados [15]. El porcentaje de material de tamaño inferior al tamiz #200 en el material de afirmado incide en la compactación y resistencia de la estabilización, se recomienda limitar los contenidos mínimos y máximos de finos con el propósito de obtener buenos

resultados en la estabilización [11]. La Tabla 1 muestra las características recomendadas para el material a utilizar [16].

Tabla 1. Características recomendadas para el material

Table 1. Recommended material characteristics

CARACTERÍSTICA	PREFERIDO	ACEPTABLE
Tamaño máximo	19 mm	25 mm
Porcentaje pasa tamiz #4	55 - 65	50 - 70
Porcentaje pasa tamiz #200 (no plástico)	14 - 17	12 - 17
Porcentaje pasa tamiz #20 (plástico)	12 - 15	8 - 15
Índice de plasticidad	2 - 9	No plástico
Porcentaje de abrasión	< 30	< 40
Porcentaje de partículas facturadas	> 85	> 75

2.3. Diseño del espesor de la capa de afirmado

Durante la revisión bibliográfica no fue posible encontrar un método específico para el diseño del espesor de afirmados estabilizados con cloruro de calcio, sin embargo existen varios métodos para el diseño de espesores de afirmado [11,17,18]. El método de diseño AASHTO simplificado para el diseño en vías con bajos volúmenes de tránsito puede ser usado para la determinación del espesor de la capa de afirmado estabilizada con cloruro de calcio. AASHTO presenta dos aproximaciones para el diseño de vías en afirmado, la primera está basada en nomogramas y la segunda basada en catálogos de diseño [19]. La determinación del espesor de la capa de afirmado involucra el análisis de los factores que afectan la durabilidad de la misma. Los principales factores a considerar en la determinación del espesor de la capa de afirmado son el tránsito, las condiciones climáticas, las características mecánicas de la subrasante y del material de afirmado.

Una dificultad de la aplicación de este método en Colombia, es que éste basa los efectos ambientales en las regiones climáticas de los Estados Unidos. El método define 6 regiones climáticas, numeradas desde I a VI, en las que las estaciones son asociadas con el estado de saturación de la subrasante; congelada, saturada, húmeda ó seca [19]. En este sentido, los estados de humedad de la subrasante se pueden asociar a las temporadas húmedas y secas que se presentan en Colombia, épocas de

mucha pluviosidad y épocas de muy poca pluviosidad. La época de mucha pluviosidad se podría asociar con subrasante húmeda, aunque la subrasante se satura en el momento de lluvia, ésta pasa en poco tiempo al estado húmedo. La época de muy poca pluviosidad se puede asociar con el estado de la subrasante seca. Por ejemplo para el departamento del Valle del Cauca, una aproximación razonable sería utilizar la región climática IV. En todo caso el diseñador debe hacer un análisis minucioso de las implicaciones de esta decisión en el comportamiento del afirmado.

El método de diseño AASHTO suministra correlaciones de CBR con el modulo resiliente y otros ensayos [19]. Un aspecto a considerar cuando se utilizan este tipo de correlaciones con el CBR, es que el cloruro de calcio pierde su efecto cementante en estado de saturación, el cual se recupera nuevamente cuando el afirmado regresa al estado seco, por consiguiente el estado de saturación del afirmado es una condición crítica en el momento de utilizar este tipo de correlaciones [5]. Se recomienda utilizar el CBR saturado para este fin.

En ciertos casos cuando el espesor del afirmado resulte ser considerable, se puede estudiar la posibilidad de estabilizar únicamente la parte superior del afirmado, esto llevaría a un análisis de dos capas de afirmado, la primera sin estabilizar y la capa superior estabilizada.

2.3.1. Análisis del tránsito

El método de diseño está basado en el número acumulado de ejes equivalentes de 8.2 ton (ESAL) esperados durante el periodo de diseño (\bar{W}_{18}) [19]. El factor daño es un factor de equivalencia del daño relativo que produce a la vía el paso de un eje de diferente peso que el eje de referencia de 8.2 ton. Los factores daño son utilizados en el cálculo de número de ESALs en la siguiente expresión [20]:

$$ESAL = \sum_{i=1}^{m-1} F_i P_i \quad (1)$$

Donde,

m = Numero de tipos de ejes

F_i = Factor daño para el eje tipo i

n_i = Numero de repeticiones del eje tipo i durante el periodo de diseño

Los factores daño de los trenes cañeros que circulan en Colombia han sido determinados por tres métodos diferentes, el método AASHTO, el método ASSHTO simplificado y utilizando un método mecanicista. Como puede verse en la Tabla 2, no se encontraron mayores diferencias entre las magnitudes de los factores daño calculados por los tres diferentes métodos [21]. Por consiguiente es de esperarse una gran similitud en el cálculo de número de ESALs utilizando los valores reportados para cualquiera de los métodos.

Tabla 2. Factores daño de trenes cañeros
Table 2. Distress factors of sugar trains

VEHICULO	FACTOR DAÑO		
	METODO AASHTO	AASHTO SIMPLIFICADO	METODO MECANICISTA
C3-S2-R4	22.1	20.8	20.1
C3-S2-R3-R3-R3	25.5	24.3	24.8
C3-S1-R2-R2-R2-R2	18.3	17.6	19.8
T3-R3-R3-R3	14.1	12.5	11.5
T2-R3-R3-R3-R3	4.2	4.7	5.3
T3-R3-R3-R3-R3	15	13.6	16.1
T2-R2-R2-R2-R2-R2	20.6	19.6	20.5
T2-R3-R3-R3-R3-R3	5.1	5.7	6.5
C2-R3-R3-R3-R3-R3	5.1	6.3	6.7
C2-S2-R2-R2-R2-R2	19.1	18.7	19.5
C2-R2-R2-R2-R2-R2	20.6	20.1	20.8
C3-S2-R3-R3-R3-R3	7.1	7.6	8.6
C3-S2	8.4	8.4	-
C3-S3	6.7	6.5	-

El número de ESAL es un factor vital para la determinación del espesor de la estabilización y debe ser determinado de la mejor manera posible. Los conteos vehiculares son una muy buena opción en condiciones normales de uso de las vías. Para el caso de vías del sector agroindustrial, en donde el tráfico depende de las actividades productivas, concentrando el uso de las vías en sectores específicos por épocas del año, por ejemplo en épocas de cosecha, es importante considerar un análisis de uso de las

vías, analizando los sectores de trabajo, las cantidades de carga transportada y la capacidad de los vehículos. Esto permite hacer un estimado del número de viajes y conociendo las características de los vehículos calcular el número de ESALs que transitan por la vía.

Varias alternativas han sido propuestas para realizar las proyecciones del tránsito en el periodo de diseño [20]. Para el caso de trenes cañeros una manera simple de hacerlo sería asumir un porcentaje de crecimiento anual para proyectar el número de ESALs en el periodo de diseño. Las consideraciones propias del sector industrial y del crecimiento de las actividades productivas son una buena guía para la determinación de la tasa de crecimiento del tránsito de trenes cañeros.

El tránsito proyectado (\bar{W}_{18}) es generalmente el número de ESALs esperados en la vía durante el periodo de diseño. Para el diseño del espesor de la estabilización se requiere conocer el número de ESALs en el carril de diseño. La siguiente expresión es utilizada para determinar el tránsito en el carril de diseño (W_{18}) [19].

$$W_{18} = D_D \times D_L \times n \bar{W}_{18} \tag{2}$$

Donde,

D_D = Factor de distribución direccional

D_L = Factor de distribución por carril, se considera cuando hay dos o más carriles en el mismo sentido.

\bar{W}_{18} = Número acumulado de ESALs proyectados en el periodo de diseño.

3. RECOMENDACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN

La durabilidad de la estabilización depende de un buen proceso constructivo y de la calidad del material estabilizado, es importante tener en cuenta que el cloruro de calcio no elimina las deficiencias derivadas de la utilización de un material de mala calidad. El material de afirmado por sí solo, debe cumplir con las especificaciones requeridas para tal fin. Como se indica en la Tabla 1, una buena gradación y

un adecuado porcentaje de finos con alguna plasticidad son características requeridas. Si se trata de una vía existente construida con materiales que no cumplen estas características, muy seguramente la estabilización de este material no será exitosa, en este caso se recomienda colocar una capa de material nuevo con buenas características [16].

El acondicionamiento de la vía antes de la aplicación del cloruro de calcio es un factor vital para el éxito de la estabilización. Las condiciones de drenaje de la vía deben verificarse previamente a la estabilización. El estancamiento de agua en la superficie de la vía es la principal causa del deterioro. Se debe garantizar un buen bombeo lateral y unas condiciones de drenaje adecuadas a lo largo de la vía, algunos autores recomiendan un bombeo lateral mínimo del 3% [5]. Se debe realizar una escarificación de la superficie existente, esto permite la penetración uniforme del cloruro de calcio, no debe compactarse la superficie antes de la aplicación de cloruro de calcio. Durante la escarificación se puede aplicar agua para evitar las emisiones de polvo, el humedecimiento previo del material es necesario para garantizar la penetración del producto [5]. Se debe tener cuidado de no aplicar demasiada agua o de lo contrario se tendrán problemas en el momento de la compactación. Se recomienda mantener el material cercano a la humedad óptima de compactación durante la construcción [16].

Durante la aplicación la mayor dificultad es controlar la cantidad de cloruro de calcio aplicado, la aplicación de demasiado producto es tan perjudicial como la aplicación de muy poco producto, en ambas situaciones se perjudica la capacidad de soporte [6]. Cuando el material se aplica en base líquida se puede utilizar un carro tanque con sistema de bombeo y una flauta esparcidora, con estos equipos se logra controlar muy bien la aplicación. Si el producto se aplica en base sólida se puede utilizar un máquina de aplicación de fertilizantes agrícolas, con estos equipos se logra controlar muy bien la dosificación. Lo más importante durante el proceso de aplicación del cloruro de calcio, ya sea de manera líquida o sólida, es que el equipo utilizado se pueda calibrar adecuadamente y que el producto se

pueda aplicar uniformemente sobre la superficie. Otro aspecto importante es programar la aplicación en fechas en las que la probabilidad de lluvia inmediatamente después de la aplicación sea poco probable, la lluvia lavaría el producto de la superficie y la efectividad y durabilidad de la estabilización se vería afectada.

Si no se tiene experiencia previa en este tipo de trabajos, se recomienda hacer un tramo de prueba corto, un tramo corto de entre 200 a 300 m es suficiente para tal fin [16]. Esto le permitirá el personal de la construcción familiarizarse con los procedimientos y además se podría realizar la calibración de los equipos de aplicación del producto, esta calibración se hace con el propósito de asegurar una aplicación uniforme del cloruro de calcio sobre la superficie y con la dosificación adecuada. Durante la calibración se pueden determinar la velocidad del carro tanque y el número de pasadas, este proceso se puede realizar con agua días antes de la aplicación de cloruro [6].

El proceso de compactación se puede hacer con vibro compactadores o compactadores de ruedas neumáticas [16]. Si cuando se aplica el cloruro de calcio en forma líquida, se presentan problemas de compactación debido a altos niveles de humedad, se puede esperar a que los contenidos de humedad bajen y luego se puede realizar el proceso de compactación. Una vez compactado y en lo posible uno o dos días después de la construcción, se recomienda aplicar un rociado superficial de cloruro de calcio en forma líquida, esto permite uniformizar la superficie de la estabilización mejorando la efectividad en la mitigación de polvo. Este rociado se puede hacer con menor porcentaje de cloruro de calcio, un porcentaje de 0.25% se ha usado con buenos resultados [16].

4. CONCLUSIONES

La estabilización de afirmados con cloruro de calcio es una buena alternativa para el control de las emisiones de polvo en el sector agroindustrial Colombiano. Pocas experiencias con respecto a este tema han sido reportadas en

la literatura científica nacional, mayores estudios son requeridos para desarrollar una base sólida de conocimiento en este tema. Futuras investigaciones podrían incluir estudios en laboratorio, tramos de prueba, análisis de la determinación del tránsito de trenes cañeros considerando las características propias de la producción, análisis de costos, estudios del efecto ambiental de las aplicaciones de cloruro de calcio, desarrollo de modelos para predecir durabilidad y métodos específicos de diseños.

La estabilización con cloruro de calcio produce un aumento en la capacidad de soporte del material de afirmado y actúa como mitigador de las emisiones de polvo. Las condiciones de la vía son un factor importante en el efecto del cloruro de calcio en la mitigación del polvo. La durabilidad se ve afectada por las características de los materiales, el tipo de tránsito y las condiciones climáticas. La determinación del porcentaje óptimo de cloruro de calcio a aplicar es un factor importante a considerar. El ensayo de CBR presenta buenas características para ser usado para este fin. Varios porcentajes de cloruro de calcio de entre 0.5% y 2.5% son recomendados para una primera prueba con el ensayo de CBR, el resultado final dependerá de las características de los materiales.

Es recomendable realizar un tramo de prueba antes de la construcción definitiva, el propósito de este tramo de prueba es analizar la futura efectividad de la estabilización y realizar la calibración de los equipos para la aplicación.

REFERENCIAS

- [1] SANDERS. T, et al, Relative effectiveness of road dust suppressants, Journal of Transportation engineering, vol 123,no 5, 1997.
- [2] THOMPSON R.J., VISSER T. Benchmarking and management of fugitive dust emissions from surface-mine haul roads, The Institution of Mining and Metallurgy, 2002.
- [3] ASTM STANDARDS, D1739-98 Standard Test Method for Collection and Measurement of Dustfall, 2004.
- [4] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, Especificaciones generales de construcción de carreteras, Colombia, 1998.
- [5] OROBIO A, PORTOCARRERO L.M., SERNA L., Evaluación del cloruro de calcio como agente mitigador de polvo en vías en afirmado. Revista Dyna, Medellín, Universidad Nacional de Colombia, 2007.
- [6] OROBIO A. et al, Evaluación en tramo de prueba de la estabilización con cloruro de calcio de una vía en afirmado, informe final de investigación, Colombia, Universidad del Valle, 2008.
- [7] JOHNSON E. N., OLSON R. C., Minnesota Local Road Research Board Investigation 842 – Best Practices for Dust Control on Aggregate Roads. Report No MN/RC 2009-04, Minnesota Department of Transportation Office of Materials, 2009
- [8] SINGH AND BRAJA, Soil stabilization with sodium chloride, Washington D.C., Transportation Research Records, 1999.
- [9] BOLANDER P., Laboratory testing of nontraditional additives for stabilization of roads and trial surfafaces, Washington D.C., Transportation Research Records, 1999.
- [10] EPPS A., EHSAN M., Laboratory Study of Dust Palliative Effectiveness, Journal of materials in civil engineering, ASCE, 2002.
- [11] MONLUX S, Stabilizing unpaved roads with calcium chloride, Washington D.C., Transportation Research Records, 2003.
- [12] DUQUE R., GIRALDO A., Análisis de la capacidad de soporte de suelos granulares estabilizados con diferentes porcentajes de cloruro de calcio, tesis, Universidad de Valle, 2008.
- [13] PIERRE P.,et al., Laboratory study on the relative performance of treated granular materials used for unpaved roads, Canadian Journal of Civil Engineering, NRC Canada, 2008.

- [14] CHOI H.J., Soil stabilization using optimum quantity of calcium chloride with class f fly ash, Thesis, Texas, Texas A&M University, 2005.
- [15] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, Especificaciones generales de construcción de carreteras, Colombia, 1998.
- [16] MONLUX S., MITCHELL M.R., Surface-aggregate stabilization with chloride materials, U.S. Department of Agriculture, National Technology and Development Program, 2006.
- [17] DEPARTMENT OF TRANSPORT, The structural design, construction and maintenance of unpaved roads, Pretoria, South Africa, 1990.
- [18] DEPARTMENT OF THE ARMY, design of aggregate surfaced roads and airfields, Technical Manual 5-822-12, Washington, DC, 1990.
- [19] AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 1993.
- [20] HUANG Y. H., Pavement analysis and design, Pearson Practices Hall, 2004.
- [21] BUSTAMANTE A., BENAVIDES C., Estudio del Efecto de los Vehículos Cañeros en el Deterioro del Pavimento, Simposio Colombiano de Ingeniería de Pavimentos, 2005