

## Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

Proyecto: LM-PI-UI-008-11-R2

# EVALUACIÓN EN CAMPO DEL DESEMPEÑO DE MATERIALES TRATADOS CON CAL EN TRAMOS DE PRUEBA *MUNICIPALIDAD DE CAÑAS*

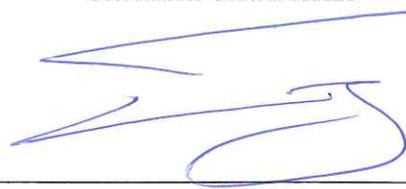
Preparado por:  
Unidad de Materiales y Pavimentos

San José, Costa Rica  
Febrero, 2014

Documento generado con base en el Art. 6, inciso g) de la Ley 8114 y lo señalado en el Cap. IV, Art. 47 Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto DE-37016-MOPT.

Preparado por: Unidad de Materiales y Pavimentos del PITRA-  
LanammeUCR jose.aguiar@ucr.ac.cr



<b>1. Informe</b> LM-PI-UI-008-11-R2		<b>2. Copia No.</b> 1
<b>3. Título y subtítulo:</b> EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO EN CAMPO DE MATERIALES TRATADOS CON CAL EN TRAMOS DE PRUEBA- MUNICIPALIDAD DE CAÑAS		<b>4. Fecha del Informe</b> Enero, 2014
<b>7. Organización y dirección</b> Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
<b>8. Notas complementarias</b>		
<b>9. Resumen</b> <i>En colaboración con la Unidad Técnica Vial de la Municipalidad de Cañas, el LanammeUCR realizó pruebas en laboratorio relacionados con la resistencia a la compresión inconfiada, índice de soporte de California (CBR) de materiales estabilizados con cal. Subsecuentemente, a principio del año 2012, fue posible construir un primer tramo de prueba con materiales estabilizados, donde inicialmente se determinó la densidad y humedad en sitio del material, y posteriormente se han venido realizando mediciones periódicas con el Deflectómetro de Impacto Ligero (Light Weight Deflectometer, LWD), ensayos con el Cono de Penetración Dinámico (CPD) y evaluaciones visuales para determinar el desempeño y el comportamiento de estos materiales en el tiempo. Los resultados obtenidos muestran hasta el momento mejoras en las características y propiedades de los materiales estabilizados con cal. Sin embargo, es recomendable continuar con un monitoreo del desempeño de estos materiales, a fin de valorar si las variaciones responden efectivamente a la incorporación de la cal o bien a una variación estacional (época seca-lluviosa) de los materiales.</i>		
<b>10. Palabras clave</b> Cal; Estabilización de subrasantes; Capacidad mecánica	<b>11. Nivel de seguridad:</b> Ninguno	<b>12. Núm. de páginas</b> 32
<b>13. Preparado por:</b>		
Ing. Gustavo Badilla Vargas Investigador  Fecha: 03 / 02 / 14	Ing. Tania Ávila Esquivel Investigadora  Fecha: 03 / 02 / 14	Fecha: / /
<b>14. Revisado por:</b>		<b>15. Aprobado por:</b>
Ing. José Pablo Aguiar Moya, PhD. Coordinador Unidad de Materiales y Pavimentos  Fecha: 03 / 02 / 14		Ing. Guillermo Loría Salazar, PhD. Coordinador General PITRA  Fecha: 03 / 02 / 14

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE IMAGENES.....	3
ÍNDICE DE FIGURAS .....	4
ÍNDICE DE TABLAS .....	4
RESUMEN EJECUTIVO.....	5
1. INTRODUCCIÓN .....	6
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	6
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	6
1.3 ANTECEDENTES.....	7
1.4 JUSTIFICACIÓN .....	7
2. CONSTRUCCIÓN DEL TRAMO .....	8
3. RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS .....	13
3.1. ASTM D6951 MÉTODO ESTÁNDAR PARA EL USO DE UN CONO DE PENETRACIÓN DINÁMICO (CPD) EN LA APLICACIÓN DE PAVIMENTOS DE POCO ESPESOR.....	15
3.2. ASTM E2583 MEDICIÓN DE DEFLEXIONES CON UN DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO LIGERO (LWD): .....	22
3.3. EVALUACIÓN VISUAL DEL TRAMO .....	26
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	30
6.1. COMENTARIOS .....	31
7. REFERENCIAS.....	32

## ÍNDICE DE IMAGENES

IMAGEN 1.TERRENO NATURAL.....	8
IMAGEN 2.ESCARIFICACIÓN INICIAL DEL TERRENO .....	9
IMAGEN 3.COLOCACIÓN DE SACOS DE CAL .....	9
IMAGEN 4.EXTENDIDO DE LA CAL .....	10
IMAGEN 5.MEZCLADO Y HOMOGENIZACIÓN DE LA CAL .....	10
IMAGEN 6.ADICIÓN DE HUMEDAD DE COMPACTACIÓN.....	11
IMAGEN 7.RECONFORMACIÓN DE LA CALZADA.....	11
IMAGEN 8.COMPACTACIÓN DEL TRAMO .....	12
IMAGEN 9.COMPARACIÓN DEL TRAMO (A) ANTES Y (B) DESPUÉS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CAL .....	12
IMAGEN 10.CONDICIÓN SUPERFICIAL DEL TRAMO, UN MES DESPUÉS (FEBRERO 2012).....	27
IMAGEN 11.CONDICIÓN SUPERFICIAL DEL TRAMO, DOS MESES DESPUÉS (MARZO 2012) .....	27
IMAGEN 12.CONDICIÓN SUPERFICIAL DEL TRAMO, CUATRO MESES DESPUÉS (MAYO 2012) .....	28
IMAGEN 13.CONDICIÓN SUPERFICIAL DEL TRAMO, SIETE MESES DESPUÉS (AGOSTO 2012).....	28

IMAGEN 14.CONDICIÓN SUPERFICIAL DEL TRAMO, DIEZ MESES DESPUÉS (NOVIEMBRE 2012) .....	29
IMAGEN 15.CONDICIÓN SUPERFICIAL DEL TRAMO, DOCE MESES DESPUÉS (ENERO 2013).....	29
IMAGEN 16.CONDICIÓN SUPERFICIAL DEL TRAMO SIN ESTABILIZAR, DOCE MESES DESPUÉS (ENERO 2013) .....	29
IMAGEN 18.CONDICIÓN SUPERFICIAL DEL TRAMO, VEINTIDÓS MESES DESPUÉS (NOVIEMBRE 2013) .....	31
IMAGEN 19.CONDICIÓN SUPERFICIAL DEL TRAMO, VEINTIDOS MESES DESPUÉS (NOVIEMBRE 2013) .....	31

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. CBR VRS PENETRACIÓN (ESTACIONAMIENTO 0+000).....	16
FIGURA 2. CBR VRS PENETRACIÓN (0+010).....	17
FIGURA 3. CBR VRS PENETRACIÓN (0+020).....	17
FIGURA 4. CBR VRS PENETRACIÓN (0+030).....	18
FIGURA 5. CBR VRS PENETRACIÓN (0+040).....	18
FIGURA 6. CBR VRS PENETRACIÓN (0+050).....	19
FIGURA 7. CBR VRS PENETRACIÓN (0+060).....	19
FIGURA 8. CBR VRS PENETRACIÓN (0+070).....	20
FIGURA 9. CBR VRS PENETRACIÓN (0+080).....	20
FIGURA 10. CBR VRS PENETRACIÓN (0+090).....	21
FIGURA 11. CBR VRS PENETRACIÓN (0+100).....	21
FIGURA 12. MÓDULO DE ELASTICIDAD (0+000) .....	23
FIGURA 13. MÓDULO DE ELASTICIDAD (0+020).....	24
FIGURA 14. MÓDULO DE ELASTICIDAD (0+040).....	24
FIGURA 15. MÓDULO DE ELASTICIDAD (0+060).....	25
FIGURA 16. MÓDULO DE ELASTICIDAD (0+080).....	25
FIGURA 17. MÓDULO DE ELASTICIDAD (0+100).....	26

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. RESUMEN DE RESULTADOS ENSAYO DE DENSIDAD EN SITIO POR EL MÉTODO DEL CONO DE ARENA .....	13
TABLA 2. RESUMEN DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD .....	14
TABLA 3. RESULTADOS DE COMPRESIÓN INCONFINADA .....	14
TABLA 4. RECOMENDACIONES PARA RESISTENCIAS A COMPRESIÓN INCONFINADA.....	15

## RESUMEN EJECUTIVO

Durante el periodo 2009-2010 el LanammeUCR llevó a cabo una serie de investigaciones relacionadas con la implementación de los ensayos de laboratorio para el diseño y evaluación del desempeño de materiales estabilizados con cal.

En el caso de la Red Vial Cantonal, muchas de las rutas existentes se encuentran conformadas por rutas de tierra o lastre. Teniendo esto en cuenta, y con la finalidad de valorar diferentes alternativas de mantenimiento fue posible en colaboración con la Unidad Técnica Vial de la Municipalidad de Cañas, la realización de pruebas en laboratorio relacionados con la resistencia a la compresión inconfiada e índice de soporte de California (CBR) de materiales estabilizados con cal. Subsecuentemente, a principios del año 2012, fue posible construir un primer tramo de prueba con materiales estabilizados, donde inicialmente se determinó la densidad y humedad en sitio del material, y posteriormente se han venido realizando mediciones periódicas con el Deflectómetro de Impacto Ligero (Light Weight Deflectometer, LWD), ensayos con el Cono de Penetración Dinámico (CPD) y evaluaciones visuales para determinar el desempeño y el comportamiento de estos materiales en el tiempo.

Los resultados obtenidos hasta el momento muestran mejorías en las características y propiedades de los materiales estabilizados con cal. Sin embargo, es recomendable continuar con un monitoreo del desempeño de estos materiales, a fin de valorar si las variaciones responden efectivamente a la incorporación de la cal o bien a una variación estacional (época seca-lluviosa) de los materiales.

## 1. INTRODUCCIÓN

Por las características geológicas de Costa Rica, los suelos de subrasante presentes en gran parte de nuestro país, son suelos con altos índices de plasticidad. Estas subrasantes son utilizadas en pavimentos como cimiento para su estructura o en rutas no pavimentadas (tierra y lastre) como superficie que estarán en contacto directo con las cargas del tránsito, ya sea en su estado natural o mezcladas con materiales granulares en los casos de caminos de lastre.

Las características de alta plasticidad están relacionadas con baja capacidad mecánica, gran susceptibilidad a la humedad y el consecuente efecto en la consistencia o deformación plástica ante las cargas.

La estabilización de suelos con cal ha sido utilizada en otros países con gran éxito, logrando aumentar la vida útil de este tipo de rutas, disminuyendo la frecuencia en el mantenimiento que, al analizar a mediano y largo plazo resultan ser soluciones competitivas económicamente, ofreciendo mejores superficies de ruedo y mejor desempeño ante condiciones de lluvia y humedad.

### 1.1 Objetivo general

Valorar el efecto de la cal como aditivo estabilizador en las propiedades mecánicas y de durabilidad del material estabilizado en tramos de prueba de un proyecto en construcción con materiales finos que presentan índices de plasticidad (IP) medios y altos

### 1.2 Objetivos específicos

- Documentar, apoyar y evaluar la construcción, comportamiento y desempeño en campo de tramos de prueba con los mismos materiales estabilizados en laboratorio.
- Evaluar las variaciones en campo del comportamiento y propiedades físico-mecánicas de materiales estabilizados con cal.
- Evaluar el cumplimiento de especificaciones y desempeño para materiales estabilizados con cal en ensayos de campo.

### **1.3 Antecedentes**

Como antecedente a este proyecto durante el año 2008 se presenta por parte de la Unidad de Investigación en Infraestructura Vial del LanammeUCR, un proyecto de investigación enfocado en recopilar información y experiencias en el tema de la estabilización y mejoramiento de rutas no pavimentadas, teniendo como producto la “Guía para la estabilización y mejoramiento de rutas no pavimentadas”. Así mismo durante el año 2009 se desarrolló el proyecto denominado “Implementación de los ensayos de laboratorio para el diseño y evaluación del desempeño de materiales estabilizados con cal”.

En el año 2010 el LanammeUCR llevó a cabo el proyecto de investigación “Implementación de la metodología de diseño para materiales tratados con cal en la construcción y evaluación del desempeño de tramos de prueba en un proyecto en construcción”, el cual presentó los resultados de laboratorio obtenidos de la resistencia a la compresión confinada, CBR y módulo resiliente obtenido para materiales estabilizados con cal.

En el año 2011, en colaboración con la Unidad Técnica Vial de la Municipalidad de Cañas, el LanammeUCR llevó a cabo ensayos de laboratorio para determinar la dosificación y el desempeño en laboratorio para un material estabilizado con cal.

### **1.4 Justificación**

Como se mencionó anteriormente la estabilización de suelos con cal ha sido utilizada en otros países con gran éxito ante condiciones de lluvia y humedad extrema, condiciones característica de muchas regiones presentes en Costa Rica, en donde la época lluviosa abarca más del 50% del año.

Otra consideración importante es que este tipo de soluciones, no son exclusivas de caminos de tierra, sino también es utilizada en carreteras de lastre, además del mejoramiento de sub-rasantes dentro de una estructura de pavimento para volúmenes medios y altos de tránsito, mejorando por mucho la capacidad estructural de estos materiales, impermeabilizando el resto de capas de la estructura y evitando la migración de finos o contaminación del paquete estructural.

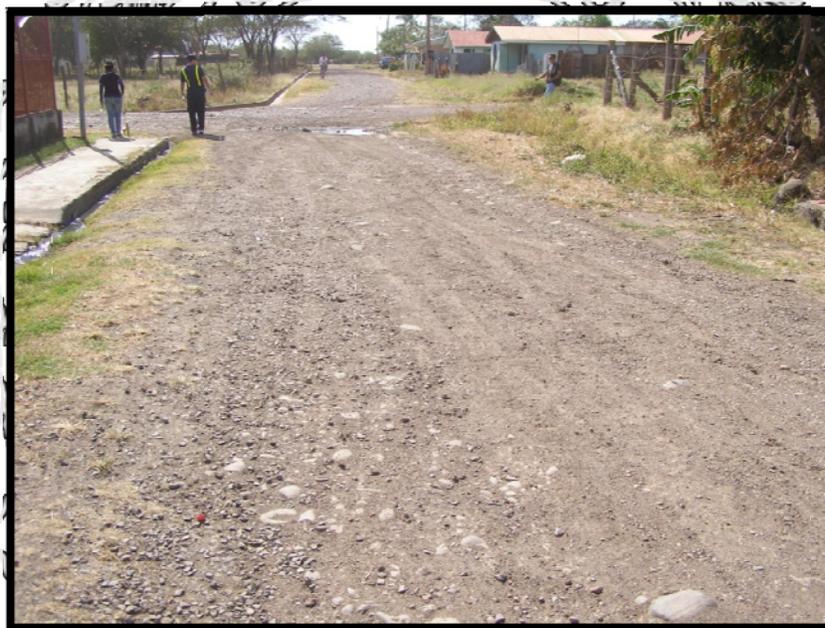
Así pues se plantea este proyecto de investigación con la finalidad de evaluar en campo el comportamiento y desempeño de este tipo de materiales ante condiciones ambientales y de tránsito

reales, de manera que se puede evaluar de una manera práctica la aplicabilidad y puesta en obra de este tipo de alternativas.

## 2. CONSTRUCCIÓN DEL TRAMO

Con base en las recomendaciones del informe de investigación LM-PI-UI-008-11 Evaluación del desempeño de materiales tratados con cal en tramos de prueba – Municipalidad de Cañas, en el cual se presentaron los resultados obtenidos en laboratorio, se planteó la construcción de un tramo de prueba con una longitud de 100 metros a lo ancho de toda la sección transversal del pavimento para la evaluación en campo del tratamiento con cal.

En las imágenes 1 a 9 se resume el procedimiento constructivo del tramo de prueba. En el caso de la imagen 1, se observa la condición natural del tramo a estabilizar.



**Imagen 1.** Terreno natural

En la imagen 2 se observa el procedimiento de escarificación de la superficie del terreno. En este caso se hizo uso de una motoniveladora con el aditamento de “ripper” en la parte posterior, el cual ayudó a disgregar la superficie del suelo hasta una profundidad aproximada de 20 cm.



(a)

(b)

**Imagen 2.** Escarificación inicial del terreno

En el caso de las imágenes 3, 4 y 5 se observa el proceso de adición de la cal. En la metodología utilizada, se dispusieron los sacos de cal de tal manera que la separación de los mismos fuera la adecuada para lograr la dosificación sugerida conforme a los resultados de laboratorio el cual indicaba que la dosificación debía estar entre 4.5 y 5.0% por peso de material compactado. En la imagen 4, se puede notar que hubo una gran cantidad de viento que dificultó el proceso de adición de la cal. Esto resulta en una disminución real del porcentaje de cal que efectivamente tratará el material, así como en un nivel de desperdicio considerable. Adicionalmente, el material que se dispersa con el viento puede tener repercusiones importantes desde el punto de vista medioambiental y de salud para la población vecina, lo cual debe ser un detalle a considerar para futuras aplicaciones de la cal, con la finalidad de tomar medidas adecuadas de mitigación.



(a)

(b)

**Imagen 3.** Colocación de sacos de cal



**Imagen 4.** Extendido de la cal

La imagen 5 presenta el procedimiento de homogenización de la cal con el suelo, el cual se hizo con la ayuda de la cuchilla de la motoniveladora y una serie sucesiva de mezclado de homogenización. Debido a la cantidad de polvo que se levantaba con el viento en el momento del mezclado fue necesario adicionar agua para poder mitigar este aspecto (ver imagen 6).



(a)

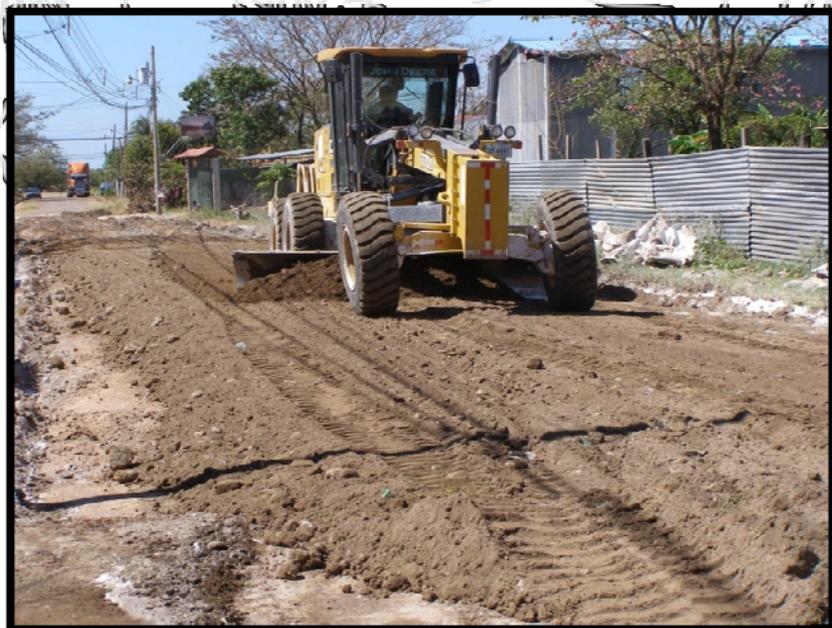
(b)

**Imagen 5.** Mezclado y homogenización de la cal



**Imagen 6.** Adición de humedad de compactación

En la imagen 7 se observa el material de suelo y la cal debidamente homogenizado. Posteriormente, este material es reconformado para darle el perfil transversal necesario y su posterior compactación (ver imagen 8). En este caso la compactación se llevó a cabo mediante el uso de un compactador vibratorio de rodillo liso, en el cual se aplicó el número de pasadas necesario para alcanzar el porcentaje de compactación requerido por encima del 95% del ensayo Próctor Estándar.



**Imagen 7.** Reconformación de la calzada



**Imagen 8.** Compactación del tramo

Finalmente, en la imagen 9 se puede observar una comparación entre el tramo antes y después de la estabilización con cal.



(a)

(b)

**Imagen 9.** Comparación del tramo (a) antes y (b) después de la estabilización con cal

### 3. RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS

Con la finalidad de evaluar la efectividad del procedimiento de estabilización con cal en campo, se determinó la densidad en campo y el contenido de humedad de compactación mediante el método de ensayo **ASTM D1556 Densidad del suelo en sitio por el método del cono de arena**. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 1. Como se puede notar en todos los casos el porcentaje de compactación fue superior al 100% cuando se comparan con la densidad máxima óptima de 1443 kg/m<sup>3</sup>. Sin embargo el contenido de humedad obtenido en campo osciló en valores entre 10,7 – 16,5 %, los cuales fueron valores inferiores al contenido de humedad óptimo obtenido de los ensayos de laboratorio(23,6%).

**Tabla 1.** Resumen de resultados del ensayo de densidad en sitio por el método del cono de arena

Estacionamiento	Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	% Compactación	% Humedad
0+000	1558	100	16,5
0+020	1575	100	15,1
0+040	1654	100	14,3
0+060	1627	100	15,4
0+080	1604	100	15,4
0+100	1535	100	10,7

Simultáneamente, se determinó mediante el procedimiento de ensayo **IT-GC-02** el **Contenido de humedad del suelo** previo a la compactación. Los resultados se presentan en la Tabla 2. Se observa que los contenidos de humedad oscilaron entre 14,7 – 26,6%, donde la mayoría de los valores fueron inferiores al 23,6% correspondiente a la humedad óptima de compactación.

**Tabla 2. Resumen de resultados del ensayo de contenido de humedad**

Estacionamiento	% Humedad
0+010	20,3
0+020	18,9
0+030	19,9
0+040	16,1
0+050	14,7
0+060	18,6
0+070	25,4
0+080	26,6
0+090	18,0

Adicionalmente, se moldearon dos especímenes de compresión inconfiada en campo, los cuales fueron envueltos en bolsas plásticas y curados por 7 días a 40°C. Finalmente se utilizó el procedimiento **ASTM D5102 B** para determinar la resistencia a la compresión inconfiada de los especímenes curados y condicionados en humedad utilizando remojo por capilaridad durante 24 horas. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3. Si se comparan estos resultados con las recomendaciones de la Asociación Americana de la Cal (National Lime Association, NLA) que se presentan en la Tabla 4, se puede observar que la resistencia obtenida para los especímenes moldeados permite que se cumpla de manera adecuada con una resistencia que permita al suelo estabilizado trabajar como una subbase en el cual se podría colocar un pavimento flexible inferior a los 20cm.

**Tabla 3. Resultados de compresión inconfiada**

Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	% Compactación	% Humedad	Resistencia a la compresión (kPa)
1487	100	25.0	614
1566	100	18.3	591

**Tabla 4. Recomendaciones para resistencias a compresión confinada**

Uso previsto	Saturación por 8 días (KPa)	Ciclos congelación-descongelación <sup>a</sup>		
		3 ciclos (KPa)	7 ciclos (KPa)	10 ciclos (KPa)
<b>SubBase</b>				
Pavimento rígido /Losas	345	345	621	827
Pavimento flexible (>25 cm) <sup>b</sup>	414	414	689	896
Pavimento flexible (20 cm – 25 cm) <sup>b</sup>	483	483	689	965
Pavimento flexible (12.5 cm – 20 cm) <sup>b</sup>	621	621	896	1103
<b>Base</b>				
	896	896	1172	1379

Notas:

a – Número de ciclo congelación-descongelación esperados en la capa suelo-limosa durante el primer invierno.

b – Total de espesor del pavimento sobre la subbase.

*Fuente: Adaptado de National Lime Association, Technical Brief: Mixture and Testing Procedures for Lime Stabilized Soils, 2004.*

### **3.1. ASTM D6951 Método estándar para el uso de un Cono de penetración dinámico (CPD) en la aplicación de pavimentos de poco espesor**

Con la finalidad de evaluar en el tiempo la capacidad de soporte del pavimento se realizaron ensayos con el cono de penetración dinámico (CPD). La capacidad de soporte se determina con la profundidad de penetración por número de golpes, proceso que consta del hincado en el suelo de una punta cónica a través de una varilla sujeta a la acción de una pesa de 8 kg la cual cae desde una altura de 80 centímetros y penetra en el suelo. En las Figuras 1 a 11, se observan los resultados de los ensayos de CPD para diferentes estaciones en diferentes épocas del año del tramo de prueba.

Las mediciones realizadas el día 10 de enero del 2012 corresponden a las condiciones del suelo natural. Por otra parte, las mediciones realizadas el 12 de enero corresponden a mediciones realizadas inmediatamente después de haberse completado la construcción del tramo de prueba. Como puede notarse, las principales variaciones en las mediciones realizadas corresponden a los primeros 20 cm superficiales del material, lo cual se relaciona directamente con la profundidad de la subrasante que fue mejorada con la aplicación de la cal. Debido al proceso de remoción del suelo, mezclado con la cal y compactación, se puede observar que los valores de CBR del día 10 de enero (suelo natural) fueron superiores a los valores de CBR del día 12 de enero (suelo mejorado con cal). Además, conforme se ha

dato el paso del tiempo se puede notar que se ha presentado un aumento en la resistencia de los primeros 20cm de la subrasante, lo cual puede sugerir hasta el momento un incremento en la resistencia del material; a pesar de ello se sugiere continuar monitoreando el comportamiento del tramo y ver si se mantiene esta tendencia.

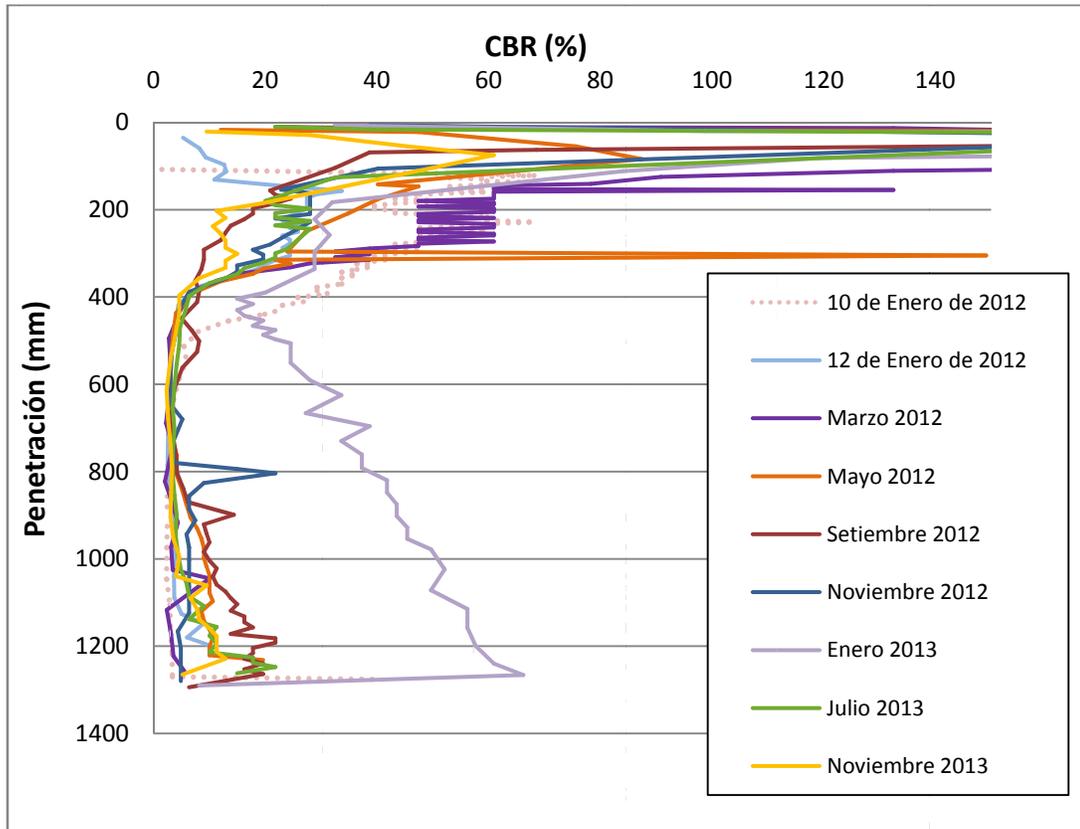
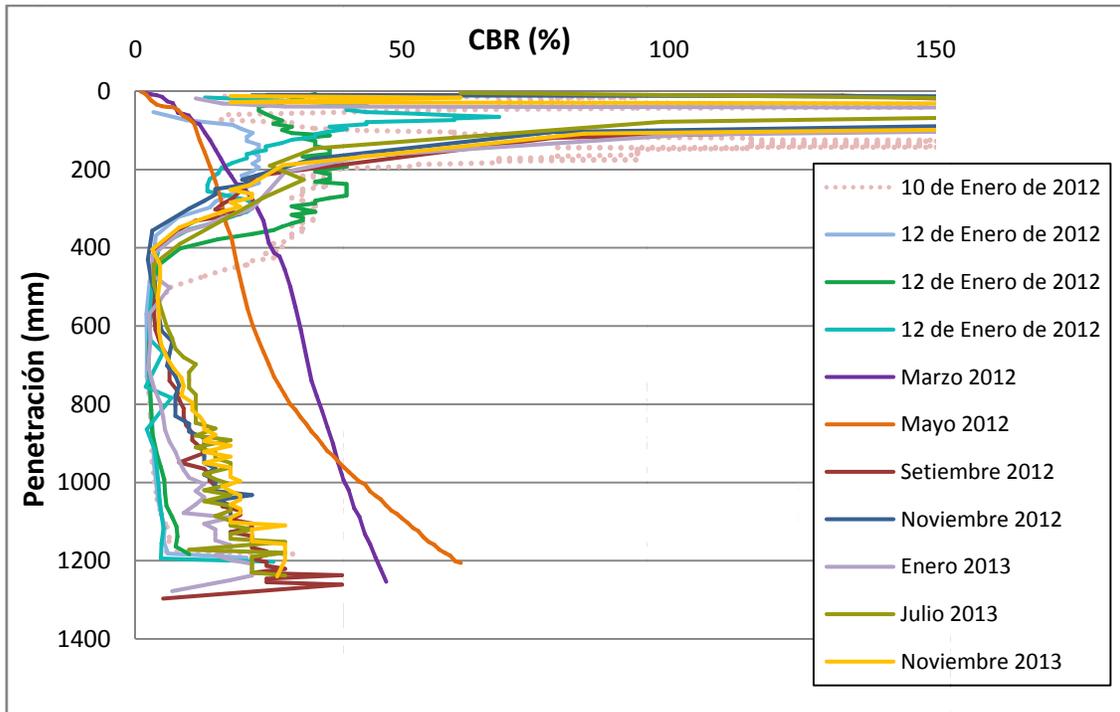
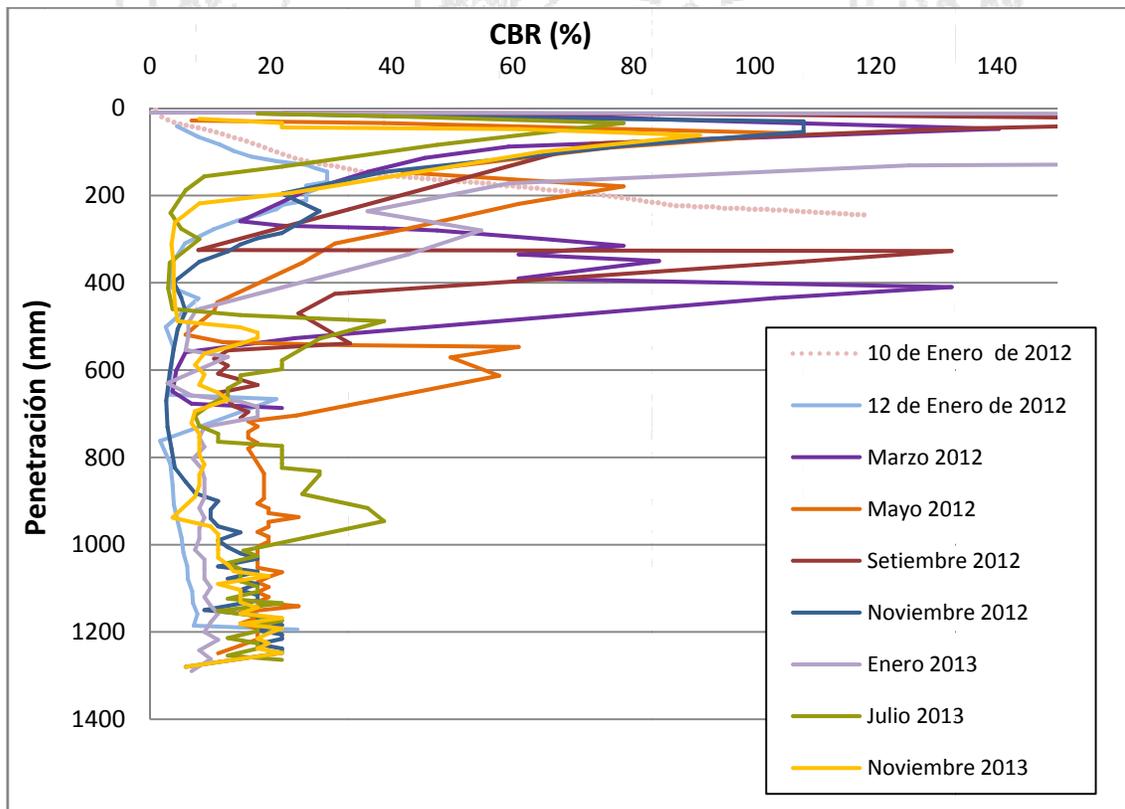


Figura 1. CBR vrs penetración (Estacionamiento 0+000)



**Figura 2. CBR vrs penetración (0+010)**



**Figura 3. CBR vrs penetración (0+020)**

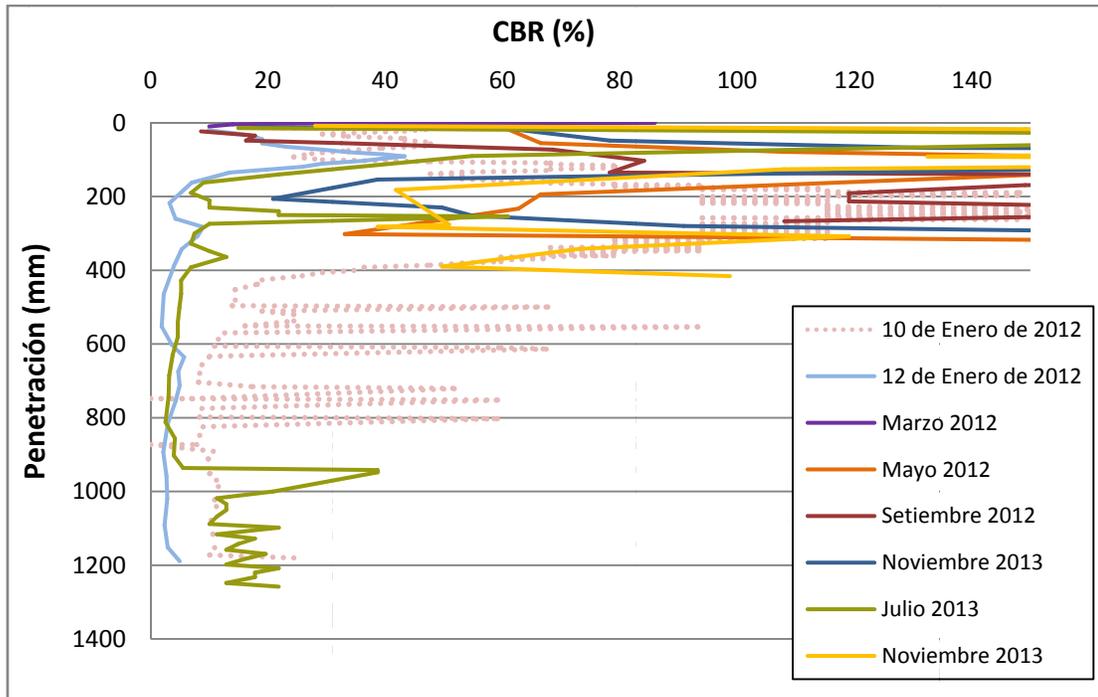


Figura 4. CBR vrs penetración (0+030)

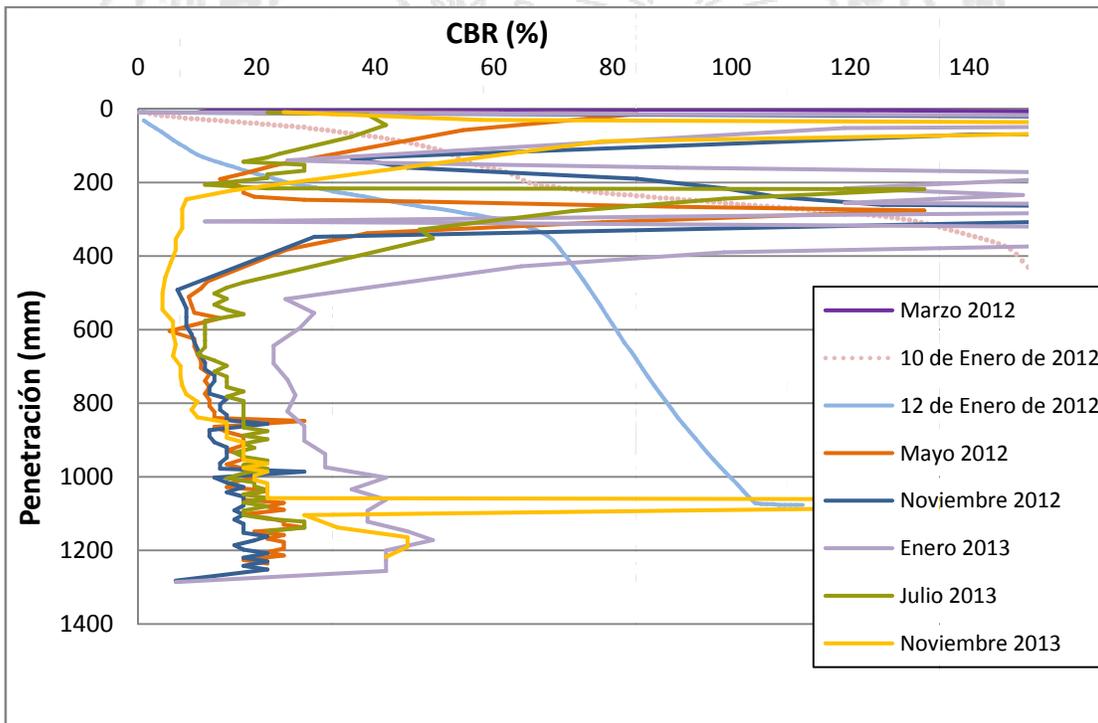


Figura 5. CBR vrs penetración (0+040)

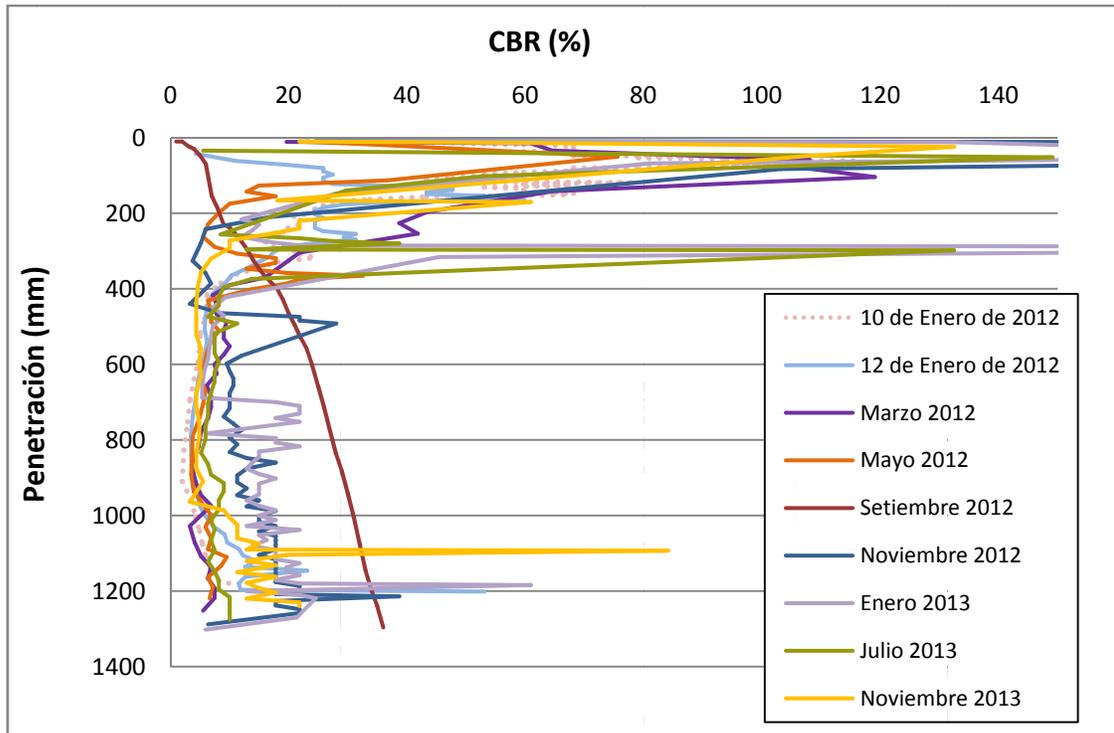


Figura 6. CBR vrs penetración (0+050)

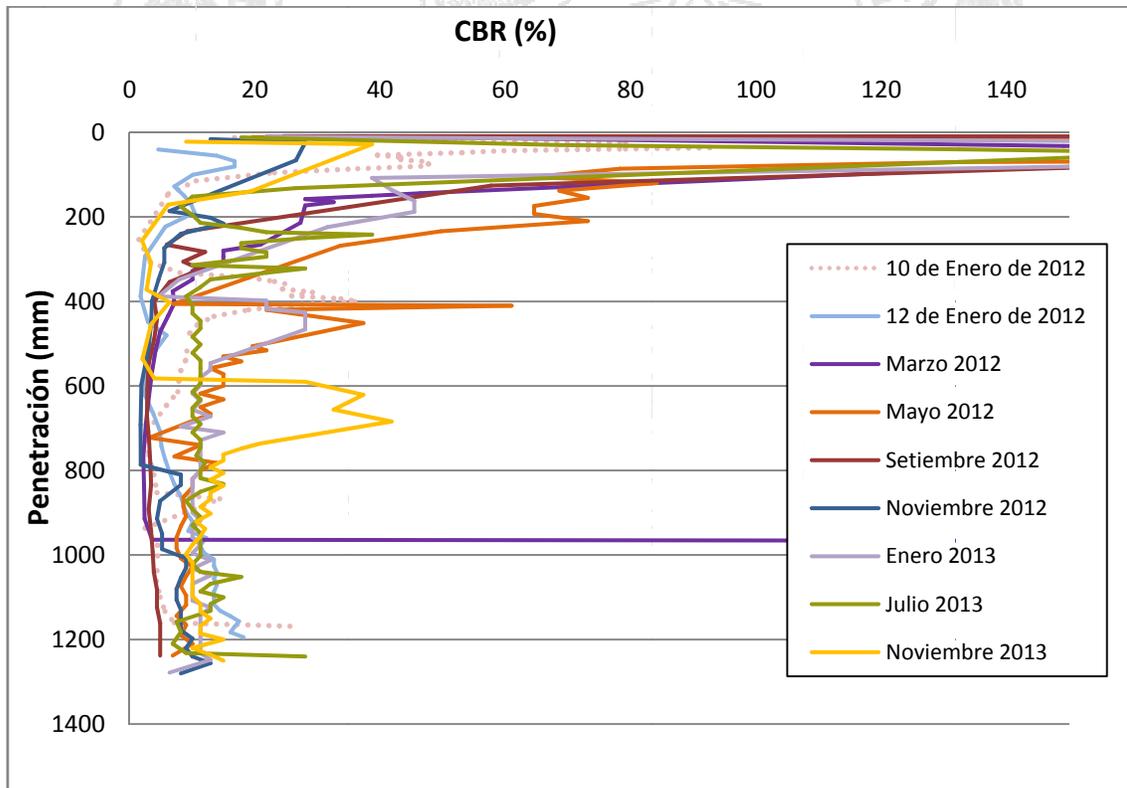


Figura 7. CBR vrs penetración (0+060)

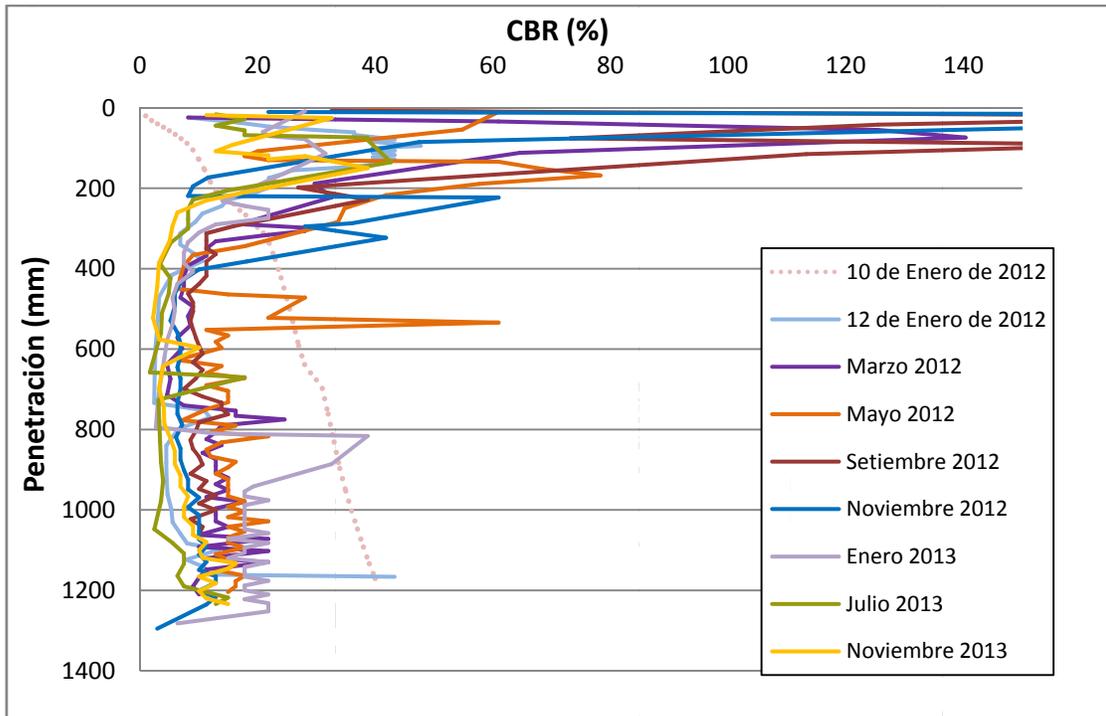


Figura 8. CBR vrs penetración (0+070)

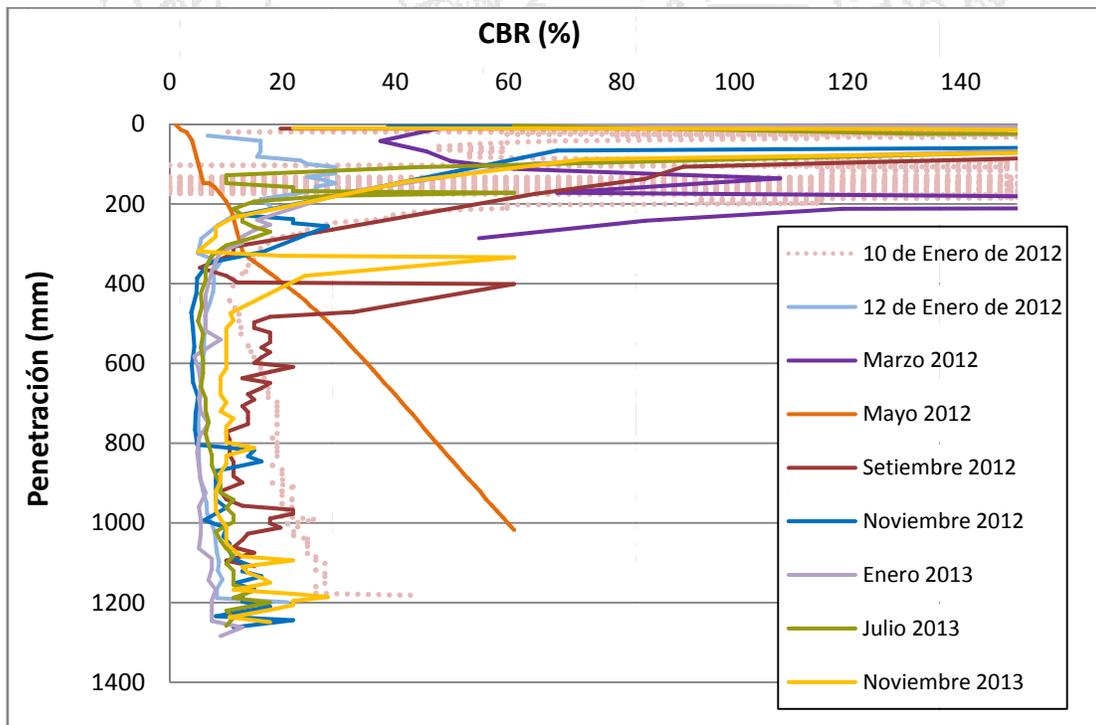


Figura 9. CBR vrs penetración (0+080)

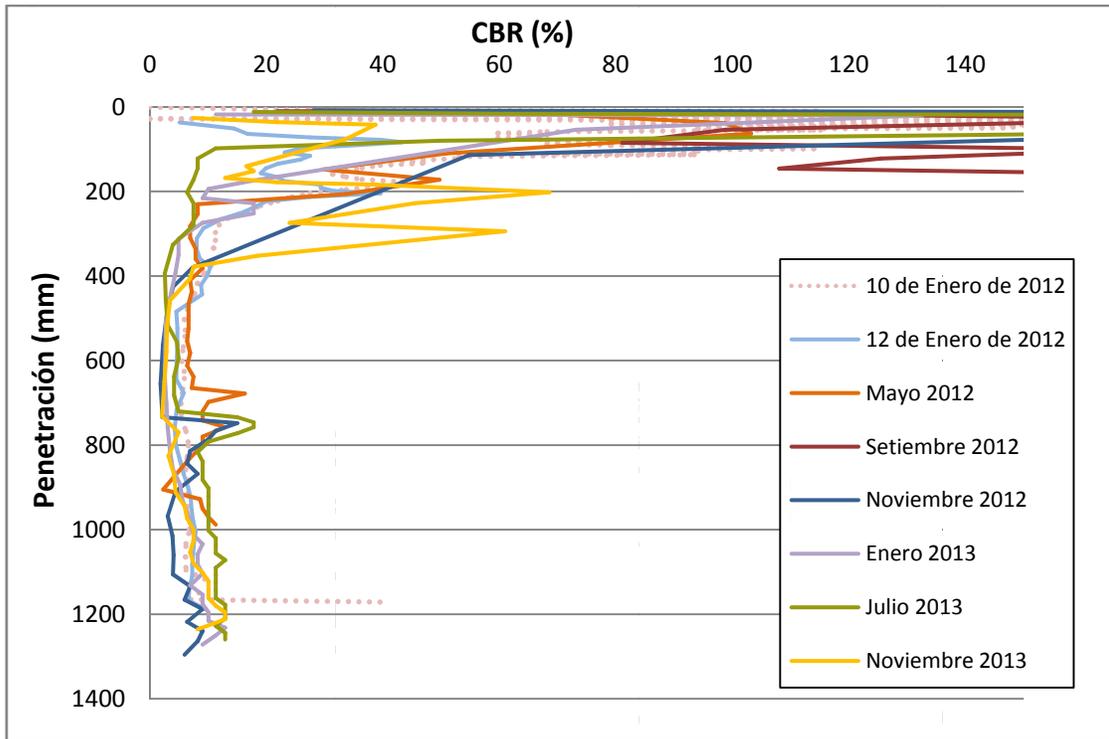


Figura 10. CBR vrs penetración (0+090)

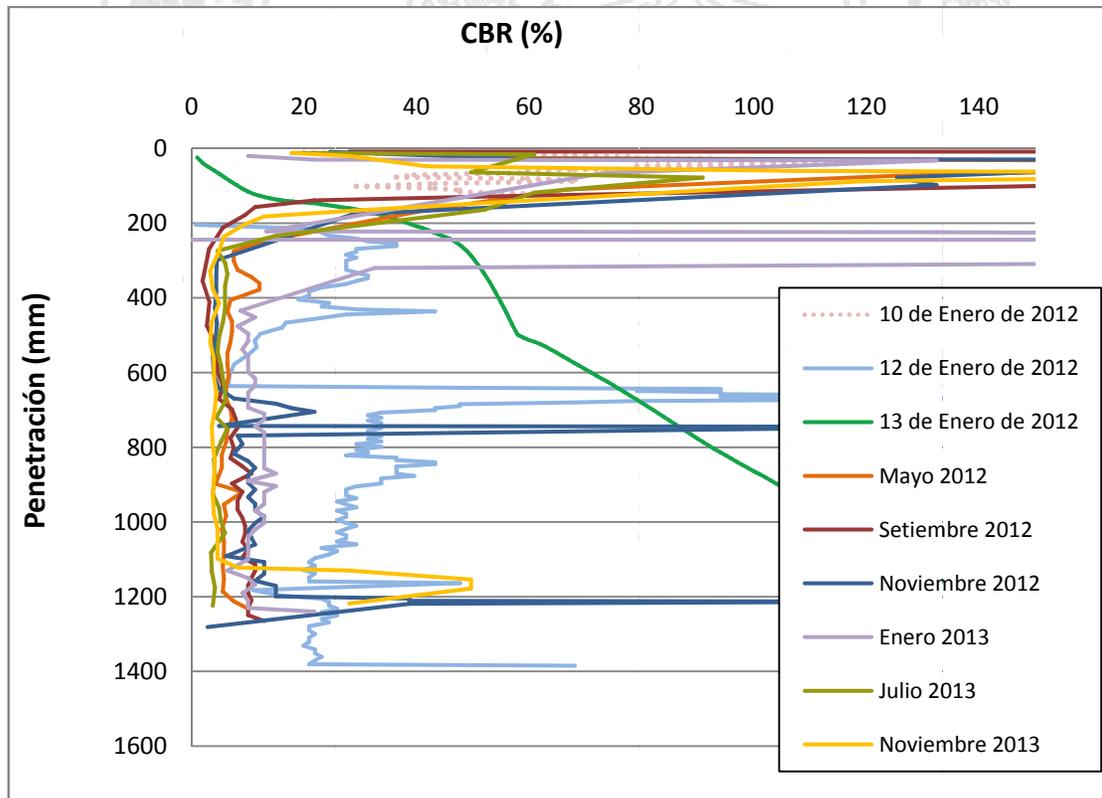


Figura 11. CBR vrs penetración (0+100)

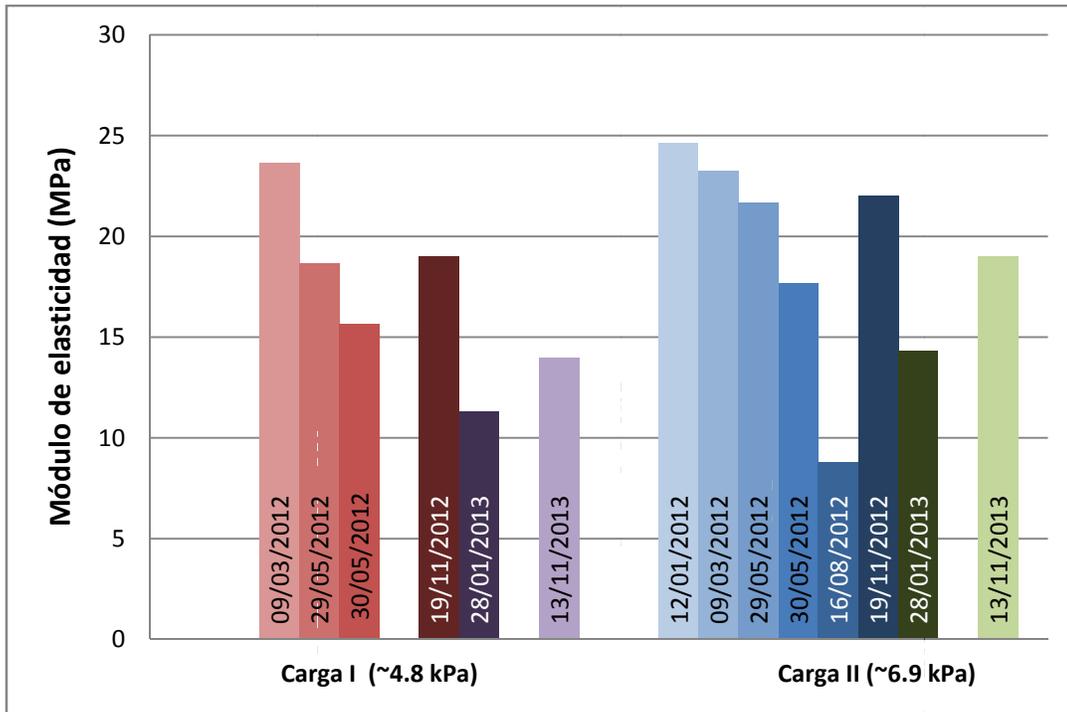
### 3.2. ASTM E2583 Medición de deflexiones con un Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD):

Tiene por objeto calcular el módulo dinámico de respuesta del suelo ante la fuerza o pulso de carga producido al dejar caer un peso o una carga en una placa circular desde una altura controlada. El equipo mide la deformación vertical (deflexión) mediante sensores en el punto de impacto. Este equipo es usado principalmente para hacer pruebas in situ durante las construcciones. En las figuras 12 a 17, se observan los resultados de los ensayos de LWD para diferentes estaciones en diferentes épocas del año del tramo de prueba. Para efectos de los ensayos realizados se utilizaron dos niveles de carga: la Carga I corresponde a una magnitud entre los 4.5-5.0 kN y la Carga II correspondiente a una magnitud entre los 6.5-7.0 kN. Para alcanzar estos niveles de carga, se dejó caer el peso desde una altura específica, posteriormente se incrementó la masa de la carga para aumentar la energía aplicada.

Se puede observar que las mediciones de módulos realizadas el día 10 de enero (suelo natural) son superiores a las mediciones realizadas el 12 de enero, lo cual corresponde a mediciones realizadas inmediatamente después de haberse completado la construcción del tramo de prueba, nuevamente estas diferencias se pueden deber al proceso de remoción del suelo, mezclado con la cal y compactación.

En el caso de las figuras 12 a 17 se puede notar que la magnitud de los valores del módulo se incrementan debido al incremento en la magnitud de la carga. Lo cual sugiere que ha mayor energía de impacto se obtiene un módulo mayor producto del aumento o cambio en el estado de esfuerzos en la superficie del material.

Por otra parte, se puede observar que el módulo del material medido durante el mes de marzo del 2012 es superior a los valores obtenidos en los meses de mayo y agosto de ese mismo año, lo cual puede estar asociado a la variación estacional del módulo asociado con la estación climática en la que se está realizando la medición, es decir, el mes de marzo corresponde a uno de los meses más secos en la región de Cañas, por lo que es de esperar un incremento en los valores de los módulos de los materiales de suelo.



**Figura12.** Módulo de elasticidad (0+000)

Finalmente, con lo respecta a las mediciones realizadas el 29 de mayo del 2012 y el 30 de mayo del 2012, se puede notar que las primeras presentan valores de módulos mayores. En este caso, ambas mediciones se realizaron en días consecutivos, sin embargo, previo a las mediciones realizadas en el segundo día, 30 de mayo, se presentó una fuerte precipitación que pudo cambiar el estado de saturación del suelo y dar pie a una reducción del módulo del material.

Cuando se observan las mediciones realizadas en el año 2012 y las mediciones del 2013, se puede observar que los primeros meses del año (por ejemplo enero) es cuando se presentan los valores mayores de módulo elástico, conforme pasan los meses estos valores tienden a disminuir, producto del inicio del periodo de lluvias y vuelven a aumentar al iniciar nuevamente la estación seca. Adicionalmente cuando se compararan las mediciones para el mismo mes Enero del 2012 vrs Enero del 2013, del material estabilizado con cal, se puede notar que en el primer año se presentan valores de módulo mayores que los obtenidos al año siguiente, lo cual puede sugerir un deterioro de la capacidad estructural del material con el paso del tiempo y el paso de los vehículos.

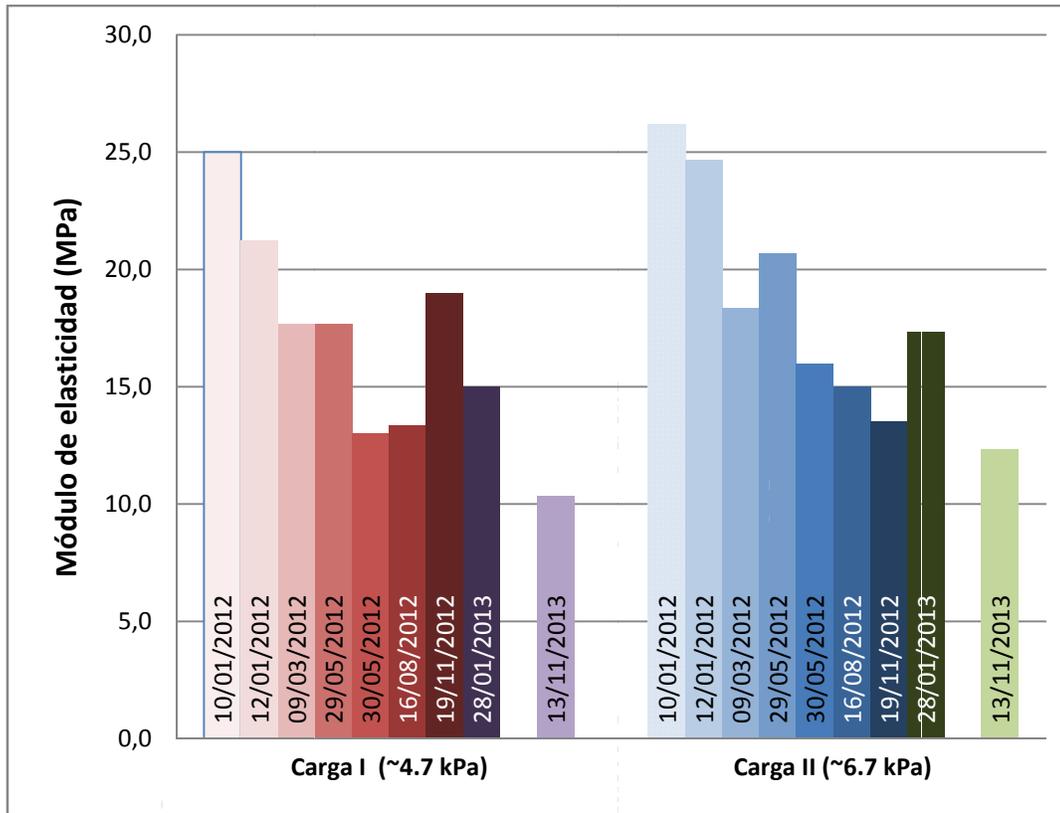


Figura13. Módulo de elasticidad (0+020)

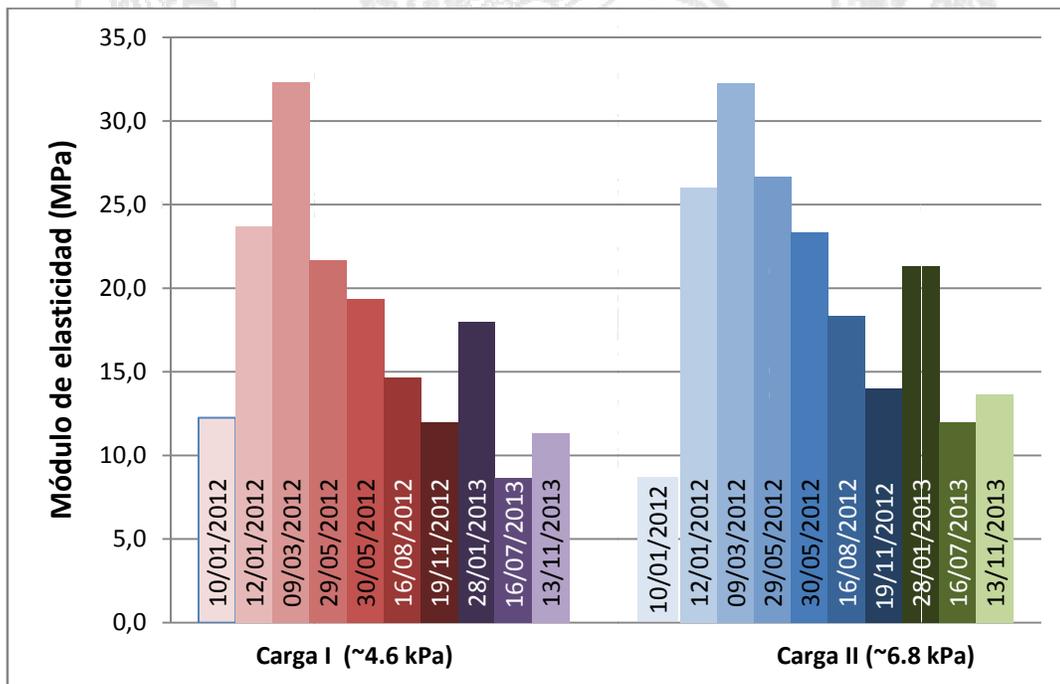


Figura14. Módulo de elasticidad (0+040)

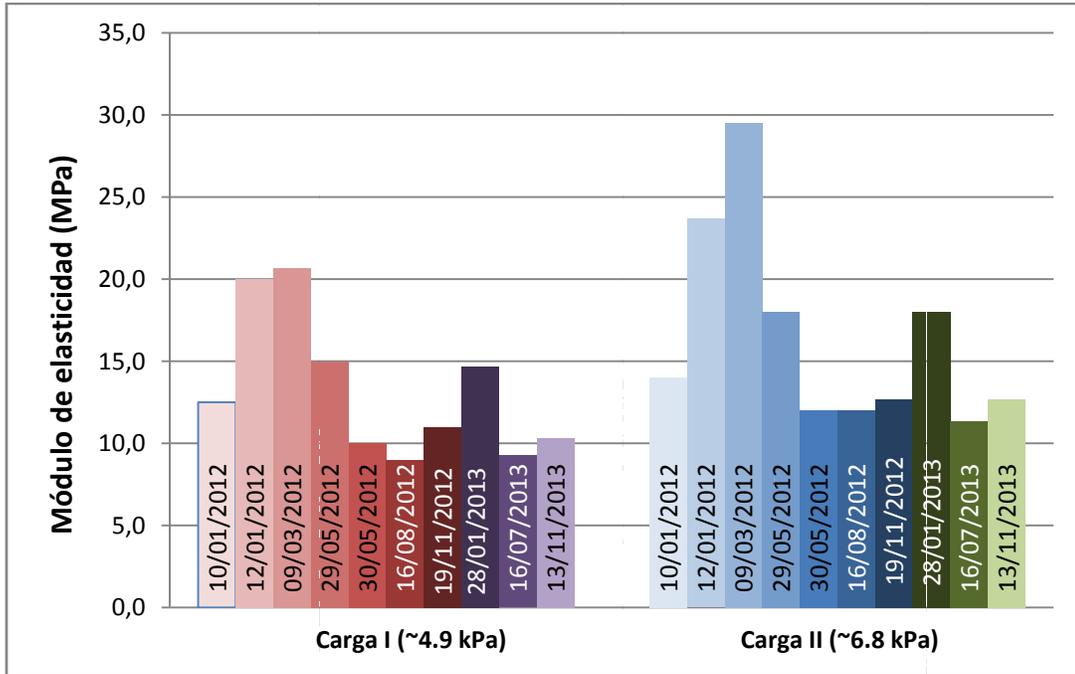


Figura15. Módulo de elasticidad (0+060)

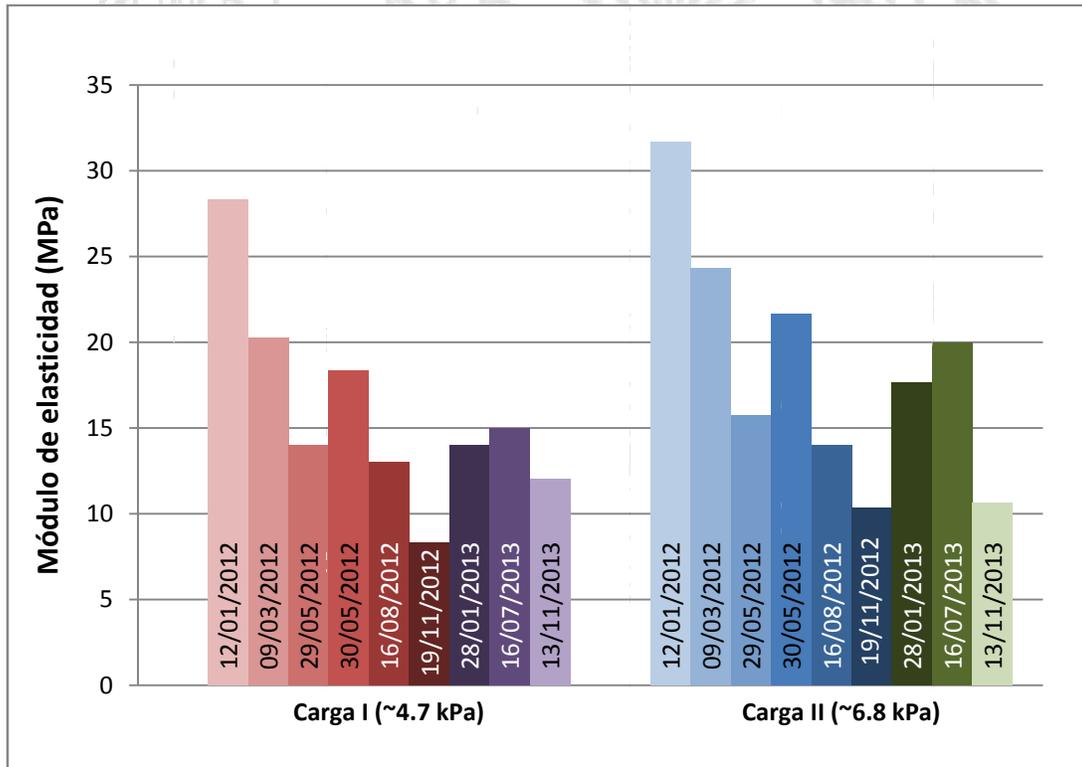


Figura16. Módulo de elasticidad (0+080)

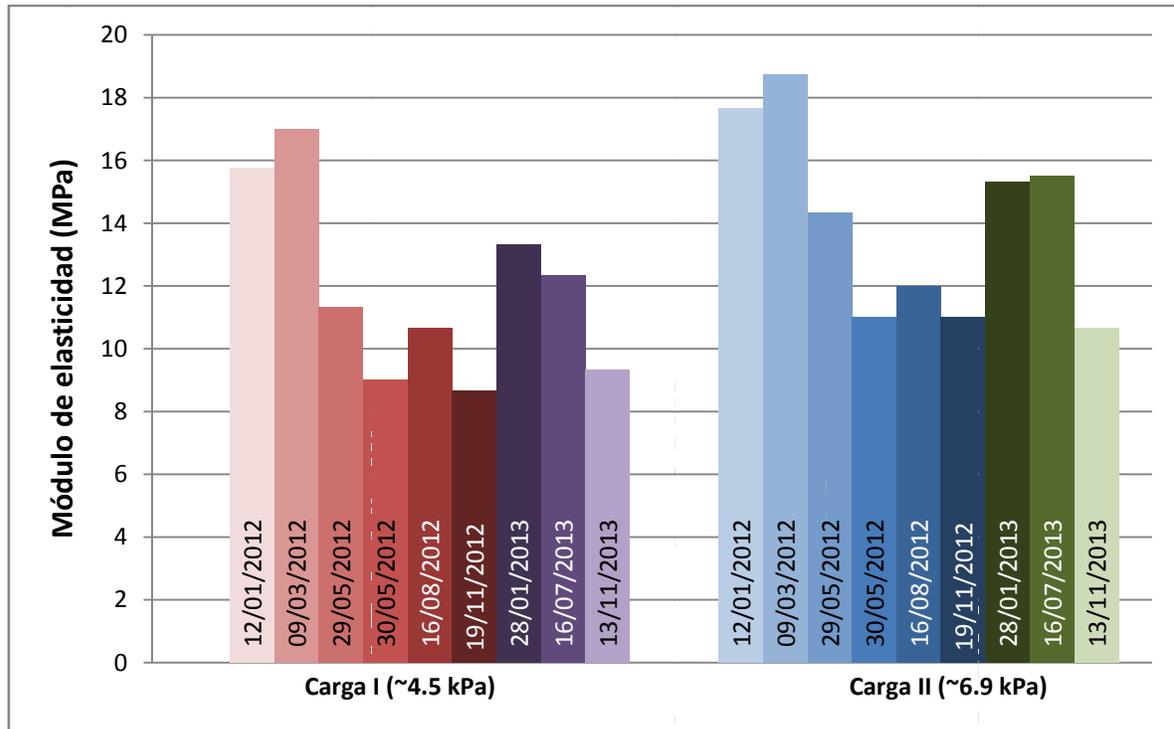


Figura 17. Módulo de elasticidad (0+100)

### 3.3. Evaluación visual del tramo

Con la finalidad de complementar y brindar herramientas para la interpretación de los resultados obtenidos en los ensayos de campo, se realizaron evaluaciones visuales del tramo en diferentes épocas del año. En las imágenes 10 a 19 se muestran las condiciones más representativas observadas.

En el caso de la imagen 10, la evaluación se llevó a cabo un mes después del tratamiento con cal de la subrasante. En este caso, se observa que el tramo presenta una gran cantidad de agrietamiento superficial, producto de la época seca característica de la región de Cañas durante el mes de febrero.

La misma situación se presentó durante el mes de marzo, donde todavía se observó una cantidad importante de agrietamiento superficial producto de la época seca (ver imagen 11).



(a) (b)  
**Imagen 10.** Condición superficial del tramo, un mes después (febrero 2012)



(a) (b)  
**Imagen 11.** Condición superficial del tramo, dos meses después (marzo 2012)

En el caso de las evaluaciones realizadas durante los meses de mayo y agosto, ver imágenes 12 y 13. Se observó una reducción del agrietamiento superficial y un aumento del desgaste superficial de la subrasante, lo cual puede deberse a la época lluviosa presente en Cañas. Igualmente, se puede observar el crecimiento de la vegetación en el cordón y caño, que a su vez genera una acumulación de agua en el borde del camino.



(a)

(b)

**Imagen 12.** Condición superficial del tramo, cuatro meses después (mayo 2012)



(a)

(b)

**Imagen 13.** Condición superficial del tramo, siete meses después (agosto 2012)

En lo que respecta a las evaluaciones realizadas en noviembre del 2012 y enero de 2013, ver imágenes 14 y 15, se puede observar que se conserva el agrietamiento superficial y un incremento del desgaste superficial de la subrasante estabilizada en algunos sectores de tramo. Sin embargo, si se compara la condición superficial del tramo estabilizado con la condición del tramos sin estabilizar, ver imagen 16, se puede notar que esta última presenta una cantidad de materiales finos sueltos muy superior al tramo estabilizado, lo que puede causar inconvenientes y problemas relacionados con el levantamiento de polvo en los alrededores.



(a) (b)  
**Imagen 14.** Condición superficial del tramo, diez meses después (noviembre 2012)



(a) (b)  
**Imagen 15.** Condición superficial del tramo, doce meses después (enero 2013)



(a) (b)  
**Imagen 16.** Condición superficial del tramo sin estabilizar, doce meses después (ene. 2013)

En la imagen 17, se observa la condición superficial del tramo dieciocho meses, al igual que en las evaluaciones anteriores se observa la presencia una gran cantidad de agrietamiento superficial y un aumento cada vez mayor de desgaste superficial de la subrasante estabilizada. Adicionalmente observa la presencia de la vegetación en el cordón y caño, que refleja los efectos de la presencia de acumulaciones de agua en el borde del camino. A pesar, de lo anterior no se observaron efectos negativos suficientes que pudieran afectar la circulación normal de los vehículos.



**Imagen 17.** Condición superficial del tramo, dieciocho meses después (julio 2013)

En el caso de la evaluación realizada veintidós meses después de la estabilización con cal, ver imágenes 18 y 19, se puede notar que el desgaste superficial de la subrasante es generalizado. Adicionalmente se sigue observando la presencia de vegetación y agua en el cordón y caño.

De acuerdo al comportamiento observado hasta este momento, se puede notar la importancia que tiene el proveer una superficie de protección del material estabilizado a través de un tratamiento superficial o "chipseal"; el cual aunque no vaya a brindar un aporte estructural a la estructura del pavimento del camino, si permitirá proteger y mantener por más tiempo las condiciones superficiales. Por su parte, se nota la importancia que tiene un adecuado control del drenaje superficial, con lo cual sería posible reducir de manera significativa el desgaste superficial y mantener condiciones superficiales adecuadas para los usuarios del camino.



(a)

(b)

**Imagen 18.** Condición superficial del tramo, veintidós meses después (noviembre 2013)



(a)

(b)

**Imagen 19.** Condición superficial del tramo, veintidós meses después (noviembre 2013)

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 6.1. Comentarios

Entre las principales ventajas obtenidas en la aplicación de la cal como agente estabilizador para el tramo de prueba de Barrio La Unión en Cañas, Guanacaste, está el empleo del suelo o material propio del terreno, manteniendo la misma cota de subrasante donde previamente ya se encontraban construidos aceras, cordón y caño.

Adicionalmente, a lo largo de las evaluaciones visuales realizadas se ha podido observar un aumento en la resistencia a la erosión superficial del material, a pesar de las condiciones extremas de viento y falta de humedad a las cuales se ha visto expuesto el tramo de prueba.

Del proceso constructivo es importante mencionar la dificultad que se tuvo para la adición de la cal, en donde debido al viento se produjo un levantamiento importante de polvo calizo, lo cual puede tener consecuencias importantes no solo en la dosificación de la cal, sino también, implicaciones y molestias en las viviendas cercanas. Situación que debe tomarse en consideración para futuras construcciones tomando las medidas necesarias para su mitigación.

De los resultados obtenidos se hace evidente que es necesario aplicar un adecuado proceso de compactación en campo para evidenciar realmente los beneficios de la estabilización con cal.

Se ha comprobado hasta el momento mejorías en las características y propiedades de los materiales estabilizados con cal. Sin embargo, es recomendable continuar con un monitoreo del desempeño de estos materiales.

La evaluación a lo largo del año 2012 y 2013 ha permitido observar variaciones en la respuesta de los materiales que podría estar asociado a la Variación Estacional (época seca-lluviosa). Lo a que a su vez refuerza la necesidad de contar con estructuras de drenaje adecuadas, ya que a pesar de las mejoras en las propiedades del material, el mismo siempre mantiene una susceptibilidad a la humedad, aunque en menor grado que si se tratara el suelo natural.

En este sentido, el uso de un sello o capa impermeabilizante de bajo costo para este material podría permitir extender la vida útil y mantener unas mejores condiciones superficiales.

## 7. REFERENCIAS

- National Lime Association. “Manual de estabilización de suelo tratado con cal: Estabilización y modificación con cal”. Boletín 326. Enero 2004.
- National Lime Association. “Mixture Design and Testing Procedures for Lime Stabilized Soil”. Technical Brief. Octubre 2006