UTILIZACIÓN DE LA PLACA DE CARGA DINÁMICA EN EL CONTROL DE COMPACTACIÓN DE CAMINOS FORESTALES DE LA CORDILERA DE NAHUELBUTA

R. Ceballos Troncoso [1] , M. Poblete Freire [2] y K. Leal Lepe[3]

RESUMEN:

La placa de carga dinámica se utiliza en muchos países del mundo para controlar la compactación de terraplenes, rellenos, bases y subbases de caminos, etc. En geotecnia, la popularidad de este dispositivo se debe al hecho de que los ensayos se pueden realizar muy rápidamente y los resultados son inmediatos.El ensayo mide la deformación de la placa al ser impactada por una masa de 10 kg que cae sobre ella. De allí se determina la deformación del suelo debajo de la placa. El desplazamiento máximo obtenido durante la prueba de impacto se utiliza generalmente para controlar el módulo de rigidez del suelo. En la actualidad, el mecanismo que se utiliza para el control de compactación en los caminos forestales es el ensayo cono de arena, donde los resultados son obtenidos en un tiempo considerable, no obstante si se utilizara la placa de carga dinámica estos resultados serían inmediatos. La placa de carga dinámica posee una influencia de aproximadamente 45 cm. idonea con el espesor de caminos forestales. La implementación de la placa de carga dinámica ayudaría enormemente en la eficiencia en la que se controla la compactación de los caminos forestales.
Los resultados de los ensayos permiten concluir que es factible utilizar la placa de carga dinámica como control de compactación de caminos forestales además permite evaluar diferentes metodologias de mejoramientos de caminos como geomallas, geosintéticos, etc. Debido a su eficiencia en tiempo permite aumentar el numero de mediciones obteniendo una respuesta mas detallada de la totalidad del camino y asimismo se puede acelerar los procesos constructivos.

PALABRAS CLAVES: Placa de carga dinamica; Compactación; Caminos forestales.

ABSTRACT:

The light falling wight deflectometer, is used in many countries of the world to control the compaction of embankments, fillings, bases and subbases of roads, etc. In geotechnics, the popularity of this device should be made the fact that the tests can be performed very quickly and the results are immediate. The test measures the deformation of the plate to be impacted by a mass of 10 kilograms that falls on it. From there the deformation of the soil is determined under the plate.The maximum displacement obtained during the impact test is generally used to control the soil stiffness modulus. At present, the mechanism used for the control of compaction in the Forest roads is the sand test, where the results are obtained in a considerable time, however if we use the light falling wight deflectometer, the results would be immediate. The light falling wight deflectometer, has an influence of approximately 45 centimeters suitable with the thickness of Forest roads The implementation of light falling wight deflectometer, greatly helps in the efficiency in which the compaction of the forest of the roads is controlled.

[1] Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, rceballost@ing.ucsc.cl
[2] Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, mauro.poblete@me.com
[3] Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, klleal@ing.ucsc.cl

The results of the tests allow to conclude that it is feasible to use the light falling wight deflectometer, as the control of compaction of forest roads also allow to evaluate different methodologies of road improvement such as geogrids, geosynthetics, etc. Due to its efficiency in time allows increasing the number Of Measurements obtaining a more detailed answer of the totality of the way and also can accelerate the constructive processes.

KEYWORDS: Light falling wight deflectometer; Compaction; Forest roads.

1. INTRODUCCIÓN

Los caminos forestales son la columna vertebral de la industria forestal. Ellos proveen el acceso para realizar las cosechas y permiten el transporte de la madera. La administración eficiente de la industria es imposible sin una adecuada red de caminos forestales (Uusitalo, 2010). Los caminos son rutas con bajo volumen de tráfico, esta definición aplica a rutas con un tráfico diario menor a 400 vehículos. Se caracterizan además por su diseño geométrico y porque están diseñadas para bajas velocidades. Alrededor del mundo este tipo de rutas son de una sola vía compuesta de grava, material estabilizado o incluso de material natural encontrado en terreno (Coghlan 1999).

A diferencia de las rutas públicas los caminos forestales se diseñan y se controlan utilizando otros criterios, con frecuencia se privilegia la rapidez de construcción y el fácil acceso a los materiales de construcción. Los caminos forestales se construyen generalmente con materiales encontrados en el lugar mezclados parcialmente con material de mejor calidad transportado de algún sitio cercano.

Los caminos forestales se construyen generalmente con dos elementos estructurales principales: la sub-base o llamada también plataforma y el pavimento o carpeta. La sub-base está compuesta por material encontrado en el lugar y luego de su compactación da lugar a la capa estructural subyacente del camino. La carpeta está compuesta generalmente por material granular o mezclas de material y en ciertas oportunidades recibe tratamiento especial en su superficie mediante polvo de roca y otros agentes cementantes (Uusitalo, 2010).

Debido a que el método constructivo de este tipo de caminos requiere de la compactación de los diferentes materiales utilizados en su construcción es que se debe llevar un control del grado de compactación de las capas en terreno. Este control generalmente se realiza utilizando como parámetro la densidad in-situ del material compactado. Se utiliza como base del diseño una densidad óptima teórica obtenida en laboratorio la cual se compara con las diferentes densidades obtenidas en terreno. Para aprobar la compactación se busca alcanzar un porcentaje de la densidad máxima teórica que generalmente alcanza el 90 o 95%.

Este tipo de procedimiento es práctico y está internalizado en el proceso constructivo por lo que funciona correctamente. Sin embargo, presenta algunas dificultades debido a que se trata de un procedimiento de lenta ejecución, sobre todo si se utilizan métodos como el cono de arena para determinar la densidad en terreno.

Otro parámetro utilizado tanto para el diseño como para el control de compactación de caminos que también se utiliza en el diseño de fundaciones, es la rigidez del terreno, frecuentemente referida también como la capacidad de soporte. Este parámetro se utiliza frecuentemente para evaluar la capacidad de uso de los caminos forestales.

El valor medido de la rigidez del terreno en los caminos forestales se puede utilizar básicamente con dos propósitos. En primer lugar, este parámetro permite determinar si una capa de terreno ha sido compactada adecuadamente. En segundo lugar, el valor de rigidez también permite determinar si el camino forestal ya construido, requiere reparación o no.

Existen diferentes equipos para determinar la rigidez del terreno in-situ, a pesar esto, la mayoría de ellos se utiliza muy poco la construcción de caminos forestales. La mayoría de estos equipos expresan los resultados medidos en términos del módulo de elasticidad. El principio de funcionamiento de todos estos instrumentos es similar y consiste en aplicar una carga al terreo para medir la deformación del mismo. El sistema de carga divide a los equipos existentes en cuatro categorías: estáticos o de carga con movimiento lento, propagación de ondas, vibración y dinámicos o de impulso (George 2003). Estos últimos son los más utilizados en el día de hoy. Dentro de los equipos dinámicos el más popular actualmente es el deflectómetro de peso descendente (falling wight deflectometer, FWD). Este equipo permite imitar de manera muy exitosa la carga aplicada por

la rueda de un camión. El FWD debe montarse sobre un carro que es arrastrado por un vehículo que permite realizar el ensayo. La versión de pequeña escala de este equipo se conoce como deflectómetro de peso descendente liviano (light falling wight deflectometer, LFWD) o también como placa de carga dinámica (PCD). Otro equipo es el penetrómetro de cono dinámico (dynamic cone penetrometer, DCP). Este equipo permite evaluar la resistencia del suelo basándose en la conversión de parámetros que derivan de ensayos empíricos.

Hasta el momento en Chile no se han utilizado equipos livianos de forma masiva para el control de compactación de caminos forestales. Esto a diferencia de países principalmente europeos donde la utilización del DCP o el LFWD lleva décadas utilizándose.

El objetivo de este estudio es demostrar la factibilidad de utilización del LFWD de aquí en adelante placa de carga dinámica (PCD), en el control de compactación de plataformas y carpetas de caminos forestales. Para cumplir con este objetivo se realizan 200 ensayos en 9 caminos de 3 fundos de Forestal Mininco. Mediante estos ensayos se obtienen las variaciones de rigidez del terreno en las diferentes capas de la vía. Se indica el método de utilización del ensayo, se proponen valores de rigidez adecuados y se propone una metodología para la implementación del equipo en el para el control de compactación.

2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se lleva a cabo en los fundos Los Barros, Santa Laura y Copihual y las Damas de Forestal Mininco, que se ubican en las regiones del Biobío y de la Araucanía (Figura 2.1). Estos fundos se encuentran respectivamente cerca de las comunas de Nacimiento, Teodoro Schmidt y Carahue.
Dentro de los 3 fundos indicados se realizaron 200 ensayos de placa de carga dinámica, (PCD) y 4 ensayos de placa de carga estática (PCE), para la calibración de los resultados.
La Figura 2.2 muestra la ubicación de los 3 fundos estudiados y las Figuras 2.3, 2.4 y 2.5 presentan la ubicación los los ensayos.

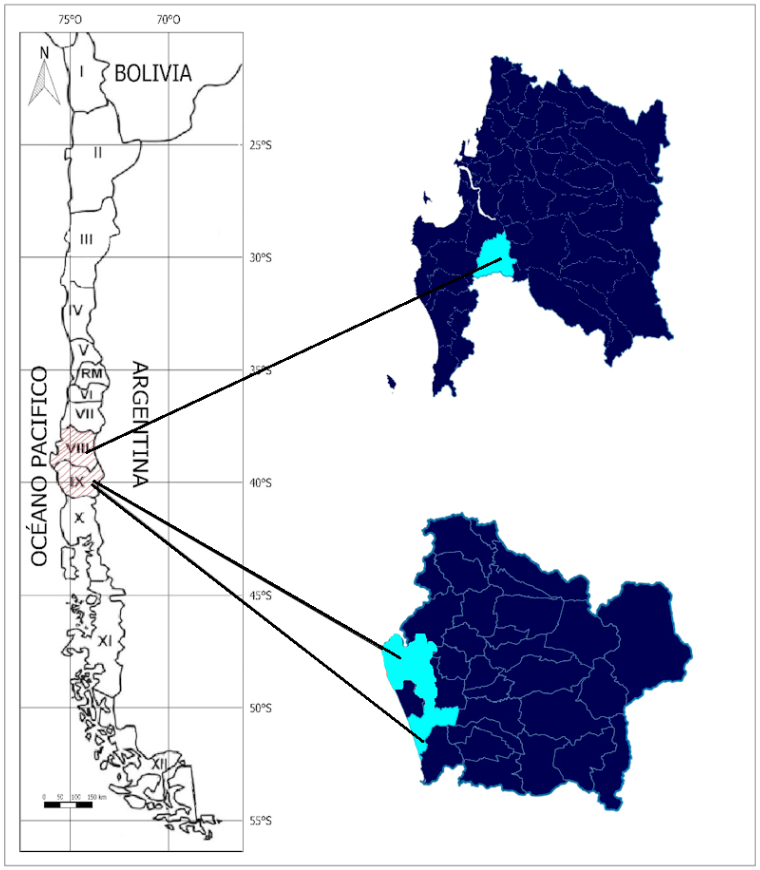


Figura 2.1: Ubicación del estudio en las regiones del Biobío (VIII) y de la Araucanía (IX).

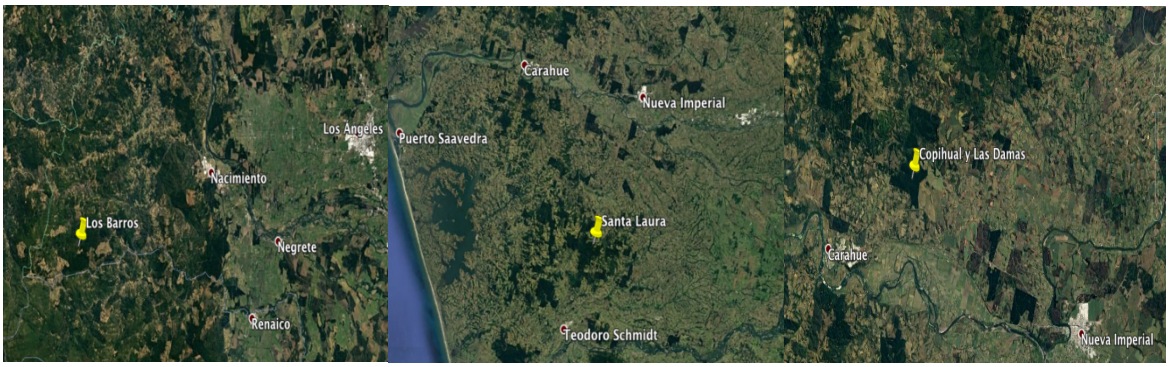


Figura 2.2: Ubicación de los fundos Los Barros, Santa Laura y Copihual y Las Damas

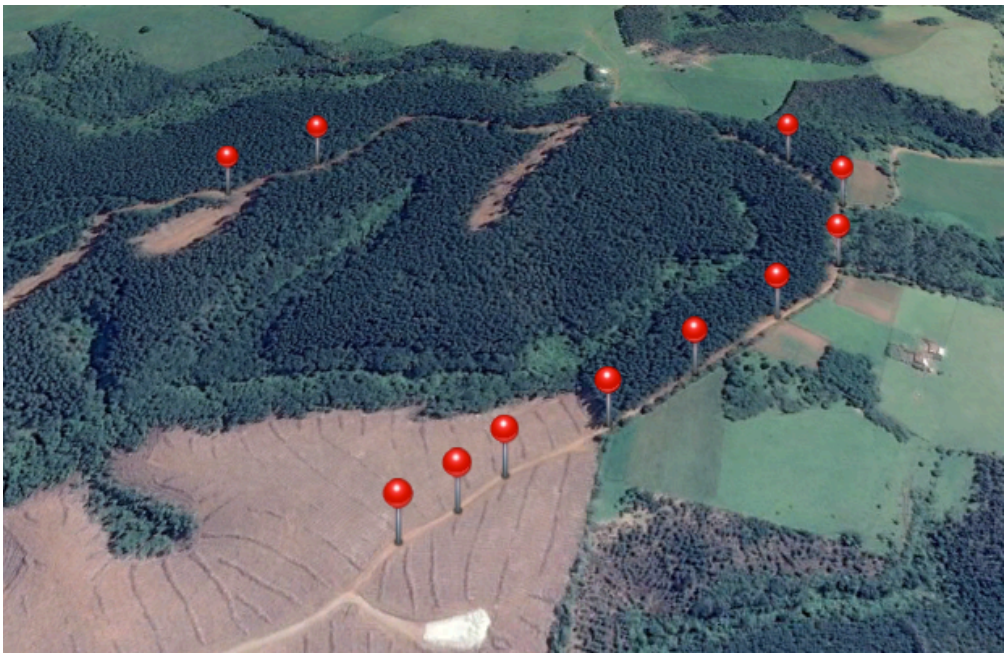


Figura 2.3: Ubicación de los ensayos en fundo Santa Laura

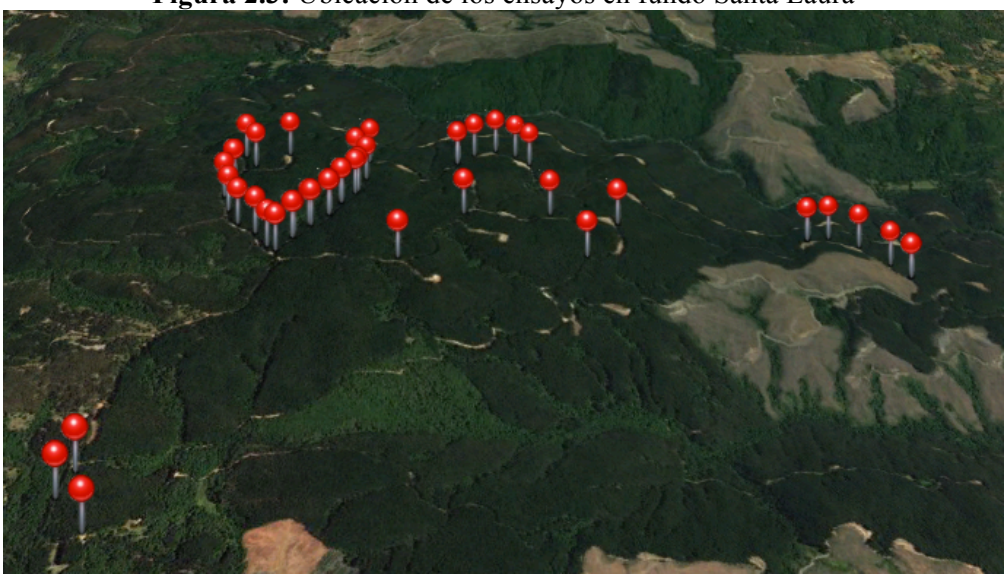


Figura 2.4: Ubicación de los ensayos en fundo Los Barros

Figura 2.5: Ubicación de los ensayos en fundo Copihual y Las Damas

2.1 Unidades geomorfológicas regionales

Las regiones del Biobío y la Araucanía cuenta con cuatro formas geomorfologías principales: Planicies litorales o marinas, Cordillera de la Costa, Depresión intermedia y Cordillera de los Andes (Figura 2.6 y 2.7). Planicies Litorales: unidad geomorfológica angosta, que se extiende desde el mar hasta la cordillera de la Costa, se amplía en el Golfo de Arauco, con terrazas marinas que alcanzan los 25km. En el subsuelo de estas planicies se encuentra la gran riqueza carbonífera de la zona. Cordillera de la Costa: Cordón montañoso, conocido entre el Río Biobío y el Río Imperial como Cordillera de Nahuelbuta, representada por cordones montañosos que forman cuencas, alcanzando alturas cercanas a los 1400 m s.n.m, constituida en gran parte por rocas metamórficas. Depresión Intermedia: Valle longitudinal que se amplía a medida que nos acercamos al norte de la región, en el sector de Chillán alcanza los 100km aproximadamente. Cordillera de los Andes: Cordón montañoso limítrofe con Argentina, que va perdiendo altura progresivamente a causa de la erosión glaciar. Al oeste de este, se puede distinguir la precordillera que corresponde a zona más baja de esta cadena montañosa.

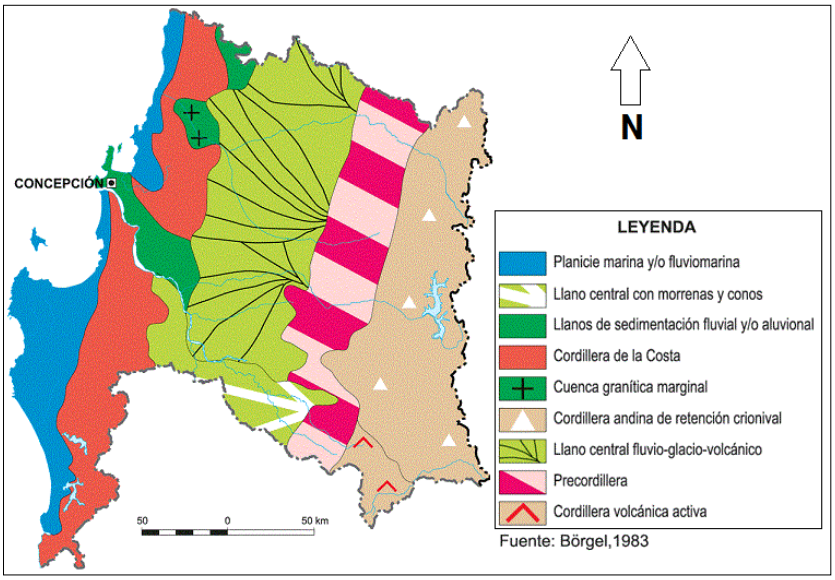


Figura 2.6: Unidades geomorfológicas presentes en la Región del Biobío. (Börgel, 1983)

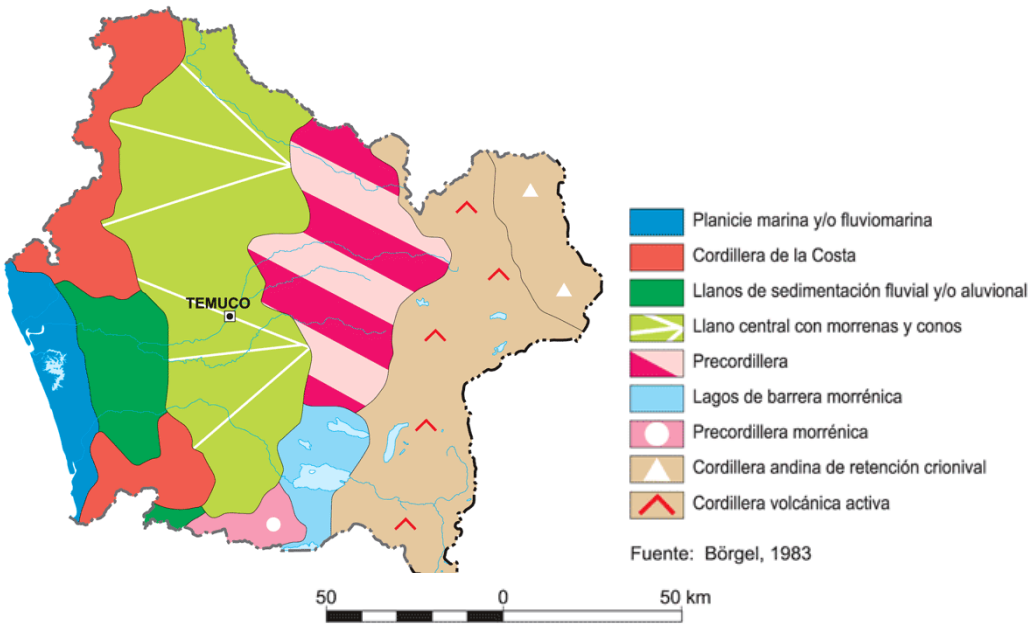


Figura 2.7: Unidades geomorfológicas presentes en la Región la Araucanía. (Börgel, 1983)

2.2 Los suelos residuales y el maicillo

Los suelos residuales se forman cuando el producto de la descomposición de la roca permanece en el lugar de origen. Para agrupar o clasificar los suelos residuales hay métodos basados en la meteorización, mineralogía, clasificación pedológica y métodos usados para usos locales y/o tipos de suelos provenientes de tipos de rocas específicas (Wesley, 2009). Producto de la meteorización de las rocas graníticas del batolito costero se forma el maicillo. Este suelo residual es el más abundante en Chile.

Estos suelos son abundantes en todos los fundos estudiados y constituyen principalmente las plataformas sobre las cuales se construyen los caminos forestales. Estos suelos presentan un contenido de finos variable pasando de limos arenosos a arenas limosas de acuerdo al sistema unificado de clasificación.

Los suelos residuales son difíciles de analizar y de trabajar y dada su formación presentan una gran heterogeneidad.

3. EQUIPAMIENTOS Y MÉTODOS

3.1 Descripción y funcionamiento de la placa de carga dinámica

El equipo de PCD utilizado en el presente estudio corresponde a un Light Weight Delfectometer for dynamic plate load test, marca Terratest, modelo 4000 USB. Elaborado por TERRATEST GmbH, en Alemania.
El instrumento está construido bajo los estándares normativos: alemán (TP BF Stb, 2003), la norma ASTM E2835 (2007) y la norma australiana RVS 080304 (2008). En la Figura 3.1 se pueden apreciar los componentes del equipo de PCD.
El ensayo de PCD consiste en aplicar al terreno una fuerza de impacto 7,07 KN, mediante una carga de masa 10 kg (Figura 3.1, nº 6) que se deja caer desde una altura de 1,14 metros, sobre una placa circular de acero de 300 mm de diámetro (Figura 3.1, nº 1). El suelo al recibir el impacto, se deforma junto con la placa. El equipo toma lectura de la deformación de la placa electrónicamente (Figura 1 nº 12). Este procedimiento se realiza 6 veces, 3 veces de precarga y 3 de carga. Con los datos obtenidos de los últimos 3 impactos se determina el módulo de deformación dinámica (Evd) que se explica más adelante.

1	Placa de Carga de 300 mm de diámetro
2	Capsula de Sensor
3	Enchufe de conexión
4	Anti vuelco
5	Amortiguador de masa
6	Masa de 10 kg
7	Agarre de masa
8	Bloqueador de masa
9	Barra guía
10	Palanca de liberación
11	Mango de Seguridad con burbuja niveladora
12	Equipo electrónico, recopilador de datos

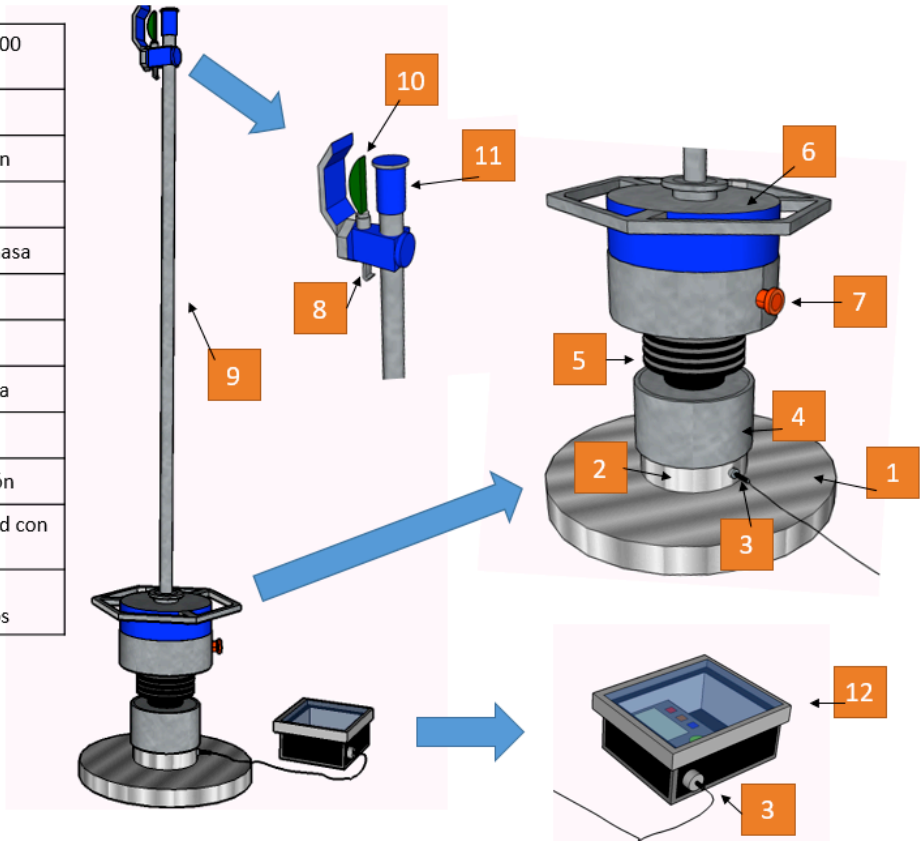
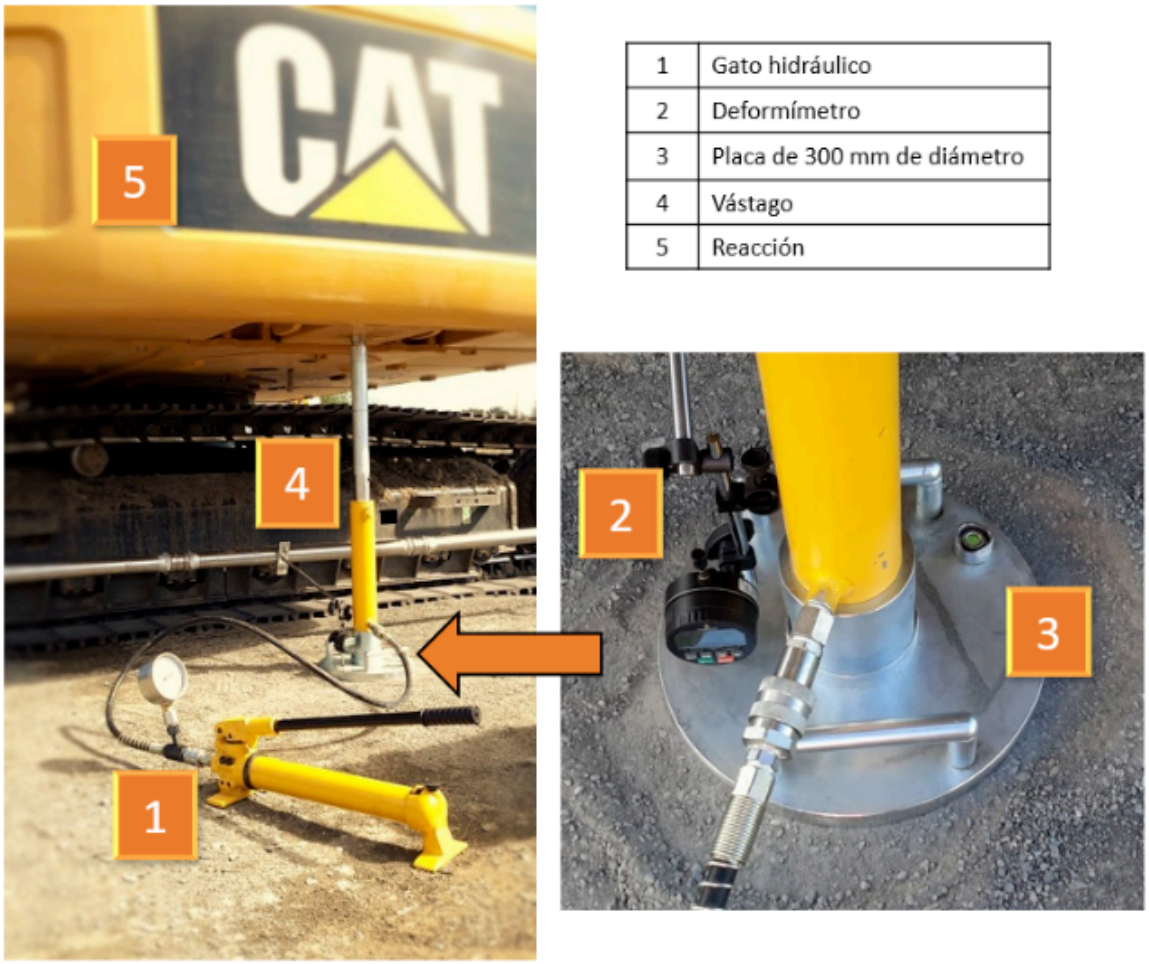


Figura 3.1: Componentes del equipo de PCD marca Terratest 4000 USB

3.2 Descripción y funcionamiento de la placa de carga estática

Además del equipo de PCD y para calibrar los resultados se utiliza el equipo de placa de carga Estática.
El ensayo de PCE consiste en aplicar distintas cargas al suelo por medio un gato hidráulico posicionado sobre una placa circular de acero de 300 mm de diámetro. La gata aplica una fuerza controlada sobre la placa por intervalos. Para cada carga se mide el descenso de la placa por medio de un deformimetro (Figura 3.2). Luego se realiza la descarga por intervalos, midiendo el desplazamiento de la placa para cada paso de carga. Este proceso se realiza 2 veces o más. Para cada ciclo, se ajusta una curva de segundo grado. Luego se obtiene la tensión máxima del ajuste para el primer y segundo ciclo para poder calcular los módulos de deformación estáticos correspondientes a cada ciclo (Ev1 y Ev2).



1	Gato hidráulico
2	Deformímetro
3	Placa de 300 mm de diámetro
4	Vástago
5	Reacción

Figura 3.2: Componentes del equipo de placa de carga estática (PCE)

3.3 Módulos de deformación Estáticos (Ev1, Ev2) y Dinámico (Evd)

El ensayo de PCD permite obtener el módulo de deformación dinámico (Evd) (Fernández, 2006; Ruiz, et al. 2009), que se puede correlacionar con el: módulo de resiliencia (Tompai, 2011; Benedeto et al. 2011), módulo de deformación elástica (Benedeto et al. 2011) y rigidez del suelo (Asli et al. 2012; Gosk, 2016).
El Evd se obtiene a partir de la Ec. (1), donde r es el radio de la placa, σ_{max} es la tensión máxima bajo la placa y S_{max} es la deformación máxima.

$$Evd = 1{,}5 \cdot r \cdot \frac{\sigma_{max}}{S_{max}} \qquad (1)$$

Como el radio de la placa es constante (Figura 3.1, nº 1) y la tensión ejercida siempre será la misma ($\sigma_{max} = 100{,}2\ \frac{kN}{m^2}$), la deformación ($S_{max}$) es la única variable a medir, por lo tanto, al realizar el ensayo de PCD se obtiene el S_{max} mediante el cual se calcula el Evd correspondiente.
Por su parte, por medio del ensayo de PCE se obtienen los módulos de deformación estática Ev1 y Ev2. Estos módulos pueden determinarse a partir de la Ec. (2), donde a_0, a_1 y a_2 son las constantes del polinomio de ajuste de segundo grado de la deformación S (Ec. 3), r es el radio de la placa y σ_{0max} es la tensión máxima normal bajo la placa obtenida por la Ec. (3).

$$Ev = 1{,}5 \cdot r \cdot \frac{1}{a_1 + a_2 \cdot \sigma_{0max}} \qquad (2)$$

$$S = a_0 + a_1 \cdot \sigma_1 + a_2 \cdot {\sigma_2}^2 \quad (3)$$

Las ecuaciones para obtener del módulo de deformación estático (Ev1, Ev2), Ec. (2) y el módulo de deformación dinámico (Evd), Ec. (1), provienen del análisis matemático de una carga puntual sobre un espacio semi infinito, basado en la teoría de Boussinesq y la deformación vertical, que se puede evaluar por medio de la teoría de la elasticidad (Otalvaro et al., 2009).

3.4 Calibración entre los módulos de deformación Estáticos (Ev1, Ev2) y Dinámico (Evd)

Ambos ensayos, el de PCD y PCE, se pueden calibrar entre sí. Al calibrar se relacionan los módulos de deformación estáticos Ev1 y Ev2, con el dinámico Evd. Esta práctica, data de los inicios de la década de 1990 y nace como una forma de otorgar confianza en los resultados de la PCD.
Luego de que Alemania se unificara, surgen divisiones en todos los aspectos, incluso en la elección del mejor método para determinar el módulo de deformación. Estaban los fieles al método comúnmente utilizado (PCE) y otros que anhelaban innovar en el área (PCD) (Thomas y Fernández, 2013). Es así como se obtiene una calibración inicial (Ec. 4) a principios de la década de 1990, con poco rigor científico (Tompai, 2011).

$$Ev2 = 2 \cdot Evd \quad (4)$$

En 1995 en el Instituto de Transporte alemán, se puso en marcha un programa de investigación con el objetivo de convertir el Evd en Ev2. De esto se obtuvo la Ec. (5), denominada formula de Baksay (Tompai, 2011).

$$Evd = 0{,}52 \cdot Ev2 + 9{,}1 \quad (5)$$

En la investigación realizada por Tompai (2011), se observa una recopilación de varios ensayos realizados en diversos suelos desde el año 1991 al 2007, obteniendo diversas calibraciones entre ambos ensayos y sugiriendo la Ec. (6) como una calibración transversal para cualquier tipo de suelo compactado.

$$Evd = 0{,}62 \cdot Ev2 \quad (6)$$

Por otro lado, Fernández, 2006 indica que a pesar de poder ocupar calibraciones Evd-Ev2 establecidas, como lo que sugiere Tompai,2011 lo mejor es hacer una calibración para cada suelo o capa granular de empleo habitual en un proyecto, zona u obra (Fernández, 2006)
Las calibraciones preestablecidas no se usan con frecuencia, sino que para cada proyecto se realiza una propia calibración inicial, para posterior a ello utilizar solo utilizar el ensayo de PCD como única medición, debido a sus ventajas por sobre el ensayo de PCE (Tompai, 2011).

3.5 Método de ejecución de los ensayos

Para estudiar el control de compactación se realizan ensayos en las diferentes etapas del proceso de construcción de los caminos forestales.
Los ensayos se dividen en dos etapas, la primera consiste en ensayar la plataforma compactada de los diferentes caminos ensayados, se realizan ensayos cada 100 m a lo largo del camino. La segunda etapa consiste en medir una vez que la carpeta ya está instalada, compactada y sellada. Estos ensayos también se realizan cada 100 m y en los mismos puntos que se evaluó la plataforma.
Según el caso se ensayaron tres tipos de perfiles. El primero consiste en la plataforma compactada cargada con estabilizado compactado (Figura 3.3a). El segundo caso es idéntico al primero, pero esta vez incluye una capa de PROES (Figura 3.3b). Finalmente, el tercer perfil ensayado considera la incorporación de geomallas o geotextil entre la plataforma y la carpeta (Figura 3.3c)

Figura 3.3: Perfiles de los caminos ensayados. a) Palataforma y carpeta, b) con PROES, c) con teotextil o geomalla

En cada caso se realizó la calibración con PCE para comparar los resultados del Evd con los Ev1 y Ev2. Para la PCE se utiliza como reacción un camión tolva cargado, o una motoniveladora (Figura 3.4). Este ensayo tiene una duración de aproximadamente 1,5 horas.

Figura 3.4: Ensayo de placa de carga estática con camión tolva como reacción.

A diferencia del ensayo de PCE el ensayo de PCD tarda solo 2 minutos en ejecutarse. Esto permite poder realizar más de un ensayo por cada punto del perfil transversal estudiado.
La Figura 3.5 presenta una propuesta de los puntos donde se podría ejecutar el ensayo en un tiempo aproximado de 10 minutos en total.

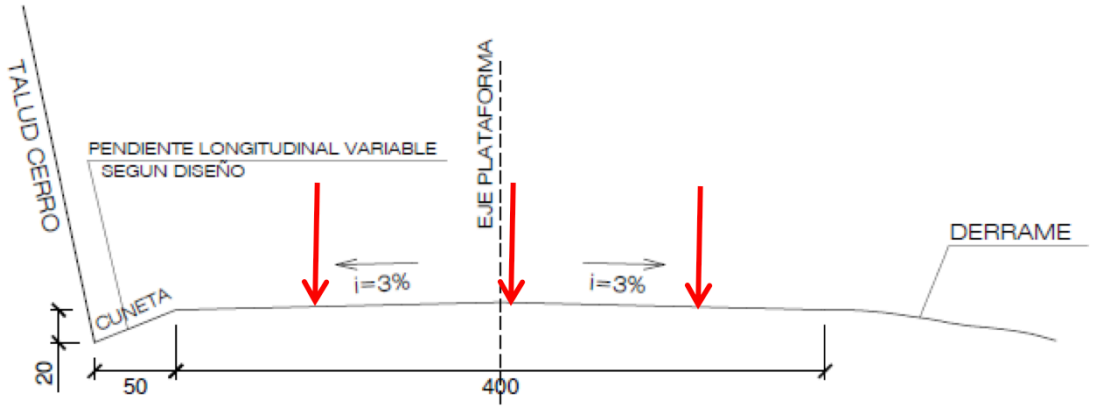


Figura 3.5: Perfil transversal tipo de camino forestal y puntos de toma de datos con PCD

4. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en terreno. Se muestran resultados representativos de cada fundo y camino principalmente mediante curvas. El detalle de los 200 ensayos realizados se encuentra en tablas anexas a este estudio.

4.1 Fundo Los barros

Se realizaron mediciones en 7 caminos, donde las especificaciones de los materiales utilizados para el camino, es de 21 cm de estabilizado de PROES, en la Tabla nº1 se muestra valores de PCD sobre los caminos del fundo Los Barros, sobre plataforma y carpeta.

Tabla nº1: Mediciones sobre plataforma y carpeta fundo Los Barros

Camino	Baliza (m)	Evd (Mpa) carpeta	Evd (Mpa) plataforma
C1 T9	600	43,1	41,9
C6	400	34,4	31,8
C6 T2	0	37,4	29,9
C6 T2	500	24,1	22,9
C6 T4	200	32,1	46,8
C6 T4	300	53,7	40
C6 T4	400	48,5	38,9
C6 T4	500	82,9	59,6
C6 T4	600	34,8	22,1

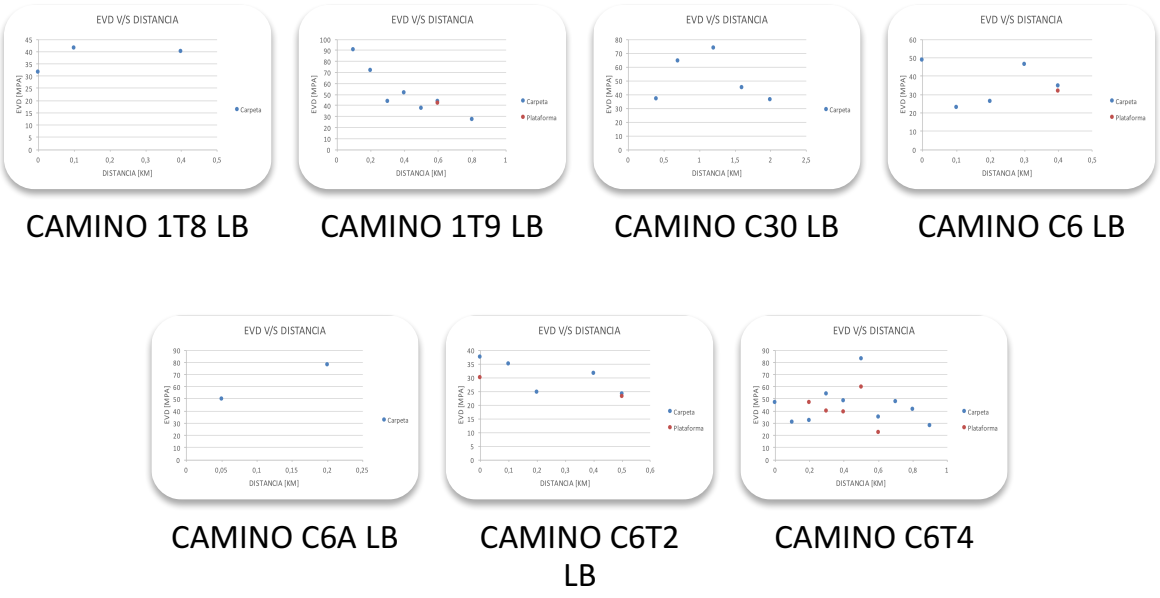


Figura 4.1: Gráficos de los diferentes caminos

4.2 Fundo Santa Laura

Se realizaron mediciones sobre el camino 4 del fundo Santa Laura (Tabla 2). Y los datos son presentados en el Figura 4.2

Tabla 2: Datos fundo Santa Laura, mediciones sobre plataforma y carpeta

Camino	Baliza (m)	Evd (Mpa) carpeta	Evd (Mpa) plataforma	Materiales
4	50	22,4	5,5	Geotextil 160 Gr + 0,20 m base
4	150	23,1	5,3	Geotextil 160 Gr + 0,23 m base
4	550	34,6	6,9	Geotextil 190 Gr + Geomalla + 0,20 m base
4	1450	36,6	6,3	Geotextil 190 Gr + 0,23 m base
4	100	28,9	6,3	0,18 m de integral + 0,10 m de base
4	250	22,3	6,2	0,18 m de integral + 0,10 m de base
4	350	41,4	8	0,18 m de integral + 0,10 m de base
4	450	28,1	6,7	0,18 m de integral + 0,10 m de base
4	650	28,3	5,4	0,18 m de integral + 0,10 m de base
4	750	40,8	6	0,18 m de integral + 0,10 m de base
4	1350	35	7,4	0,18 m de integral + 0,10 m de base

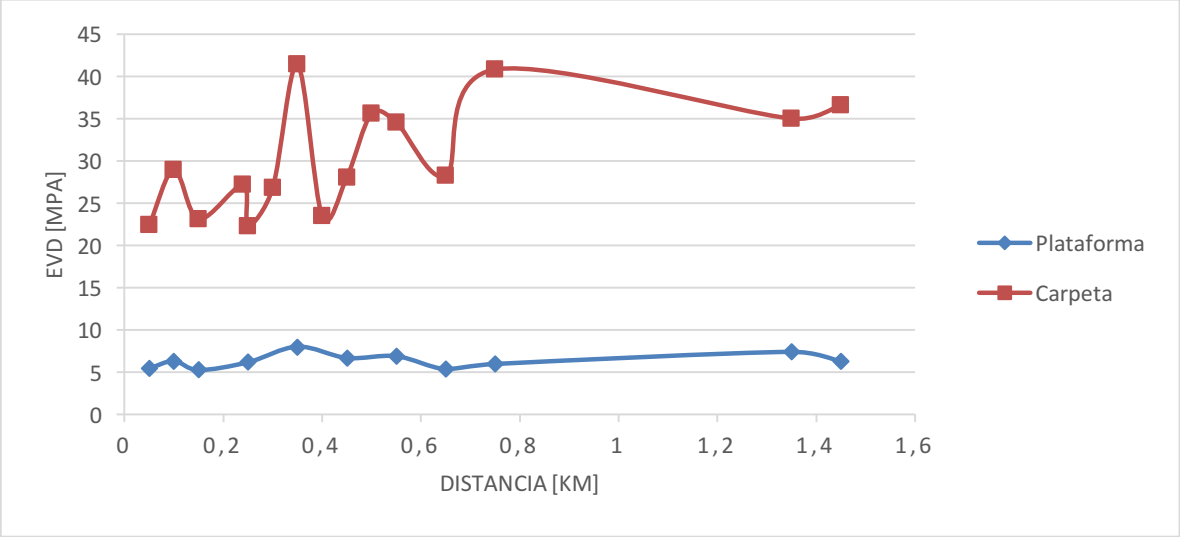


Figura 4.2: Grafico datos medidos camino 4 fundo Santa Laura

4.3 Fundo Copihual y las Damas

Se muestran los datos obtenidos en el fundo Copihual y Las Damas Mediante la Tabla 3 y la figura 4.3

Tabla 3: Datos medición fundo Copihual y Las Damas sobre plataforma y carpeta

Camino	Baliza (m)	Evd (Mpa) carpeta	Evd (Mpa) plataforma	Materiales
3	10	41,3	9,2	Geotextil 400 Gr + Geomalla + 0,25 m base
3	200	39,2	24,9	Geomalla + 0,25 m de base
3	245	29,7	16	Geomalla + 0,25 m de base
3	50	28,5	9,2	0,2 m de integral + 0,12 m de base

Figura 4.3: Datos fundo Copihual y Las Damas

5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1 Variabilidad de los resultados

Al analizar los resultados obtenidos en terreno, lo primero que salta a la vista es la gran variabilidad de los mismos. Esta variabilidad se presenta tanto en las mediciones obtenidas en plataforma como en la carpeta. Si se consideran los valores mínimos y máximos obtenidos, para plataforma se alcanza una diferencia de 54,3 MPa entre el valor mínimo y el máximo medidos. Por su parte en las mediciones de carpeta la diferencia alcanza los 60,6 MPa (Tabla 5.1).

Esta gran diferencia se explica por diferentes factores, entre los cuales se encuentra principalmente el tipo de suelo ensayado que varía según el fundo en estudio. En el caso de los resultados medidos en plataformas fue notoria la diferencia de rigidez obtenida entre el fundo Los Barros en el cual se obtuvo un módulo promedio de 37,1 MPa, en comparación los otros fundos que en promedio presentaron un módulo de 8,7 Mpa. Eso demuestra que la plataforma puede ser mucho más competente en un fundo que en otro.

Los valores medidos promedio, máximos y mínimos de los tres fundos ensayados se pueden observar en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Evd promedio, máximo y mínimo obtenidos por fundo para plataforma y carpeta.

Fundo	Evd carpeta [Mpa]			Evd plataforma [Mpa]		
	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo
Santa Laura	31,0	22,3	41,4	6,4	5,3	8,0
Los Barros	43,4	24,1	82,9	37,1	22,1	59,6
Copihual y Las Damas	34,7	28,5	41,3	14,8	9,2	24,9

Además del tipo de suelo otros factores ambientales como el tiempo transcurrido desde la compactación al momento de la medición, las variaciones de humedad y la heterogeneidad de la compactación, también influyen en los resultados.

Esta variabilidad no se observa en los resultados de densidad in-situ obtenidos mediante cono de arena. Esto más que una desventaja del método y dejando de lado por el momento, los factores ambientales, viene a confirmar la gran heterogeneidad con la que quedan compactados los caminos. Esta variación de los resultados no se puede medir mediante ensayos tradicionales de determinación de densidad. Esto de cierta forma permite explicar en parte por qué un camino falla antes de tiempo a pesar de haber pasado el control de compactación tradicional.

5.2 Aumento del módulo de deformación entre la plataforma y la carpeta

En segundo lugar se observa un aumento evidente de la rigidez medida a través del módulo de deformación dinámica (Evd), entre la plataforma compactada y la carpeta del camino.

La Tabla 5.2 muestra el aumento porcentual promedio en el valor del módulo de deformación dinámico para los tres fundos. En esta oportunidad se indica además el tipo de mejora que se aplicó en cada fundo.

Tabla 5.2: Evd promedio, máximo y mínimo obtenidos por fundo para plataforma y carpeta.

Fundo	Mejora	Evd Promedio		Diferencia
		Plataforma	Carpeta	
		[Mpa]	[Mpa]	[%]
Santa Laura	Geotextil	6,00	29,16	386
Santa Laura	Integral y Base	6,57	32,10	388
Copihual y Las Damas	Geotextil	9,20	41,30	349
Copihual y Las Damas	Geomalla	20,45	34,45	68
Copihual y Las Damas	Integral y Base	9,20	28,50	210
Los Barros	Proes	37,10	43,43	17

La diferencia entre la respuesta de la plataforma y carpeta se expresa en porcentaje calculando la diferencia entre los dos módulos encontrados y dividiendo por el módulo original. Los resultados aquí expresados, al ser promedios no contemplan las diferencias que se puedan encontrar en terreno, así como las diferencias del tipo de geotextil o geomalla utilizados. Sin embargo sirven para tener una idea global de la mejora obtenida.

En primer lugar se observa que el grado de mejora varía grandemente de un fundo a otro. De esta manera en el fundo Santa Laura la mejora es de casi un 400%, lo que quiere decir que el módulo de deformación dinámico medido en la carpeta registró un aumento de 4 veces su valor en medido en la plataforma compactada. Esto independiente de que se trate de una mejora con Geotextil o se trate de la mejora tradicional de construir el camino con Integral y Base. Aquí, sin embargo hay destacar que aplicar el Geotextil reduce la cantidad de material que se requiere incorporar al camino para obtener los mismos resultados.

En el fundo Copihual y las Damas, sucede algo similar para el caso del geotextil sin embargo en este fundo la mejora del camino con Integral y Base presentó un aumento de solo 2 veces el valor original. Para el caso de la Geomalla, el aumento es de un 68% con respecto a la plataforma.

Finalmente en Los Barros, se observa solo un leve aumento de un 17% en el móduo. Esto se puede deber a que el estado original de la plataforma compactada ya presentaba una respuesta promedio muy alta Incluso mayor a la observada en la carpeta de otros fundos medidos como se detalla en el siguiente apartado.

5.3 Evaluación de la incorporación de PROES

Resulta sorprendente comprobar que la utilización de PROES en el caso del fundo los Barros, no aporta un aumento considerable del módulo de. Esto se debe principalmente a que la plataforma compactad en dicho fundo, presenta valores de rigidez elevados, obteniendo u promedio de 37,1 MPa. Este valor se considera alto para una plataforma compactada, por lo tanto el potencial de mejora es menor al de otras plataformas compactadas.

Con esto se demuestra que la utilización de la PCD, permite evaluar la conveniente utilización de elementos de mejora como PROES. Esta evaluación se puede hacer con un análisis detallado lo que permite tomar decisiones en terreno acerca de la aplicación o no de elementos de mejora del material como PROES.

5.4 Evaluación de la utilización de Geotextil y Geomalla

Mediante la PCD se puede evaluar también la respuesta del camino en la utilización de geotextil y geomalla. En los fundos de Santa Laura y Copihual y las Damas se realizaron ensayos en plataforma y carpeta evidenciando la mejora de la respuesta en ambos casos.

A pesar de existir una mejora, el resultado obtenido, en promedio es similar al que resulta de utilizar métodos tradicionales de construcción de caminos. La diferencia sin embargo radica en el ahorro de material. Ya que en los casos en que se utiliza Geotextil o geomalla, la carpeta que se aplica sobre el geositético es de menor espesor que en los casos en que se utilizan métodos tradicionales.

Se concluye por lo tanto que la utilización de geosintéticos en la construcción de caminos permite un ahorro efectivo del material utilizado. Esto puede ser particularmente atractivo en sectores donde existen dificultades para conseguir el material estabilizado adecuado, o este se encuentra muy distante. Será necesario por lo tanto realizar una evaluación económica para determinar si la aplicación de geosintéticos es adecuada o no.

6. IMPLEMENTACIÓN

Dados los resultados presentados y discutidos en los apartados anteriores se puede concluir que el equipo de placa de carga dinámica (PCD), es factible de ser utilizado en el control de compactación de caminos forestales, así como en la evaluación de diferentes metodologías de mejoramiento de caminos como PROES, geomallas y geosintéticos.

A continuación, se propone una metodología de implementación del equipo de PCD, en el control de compactación de caminos en terreno.

En un principio se recomienda implementar la utilización del equipo netamente en el control de compactación y en paralelo a los métodos tradicionalmente utilizados como el ensayo de densidad in-situ mediante cono de arena. En una segunda etapa y con una base de datos que incluya fundos en diferentes regiones y en diferentes épocas del año, se podrán corregir los valores que se proponen a continuación, así como se podrá optimizar la metodología propuesta.

La siguiente propuesta diferencia valores aceptables para la plataforma como para la carpeta. Esto debido a los materiales que componen cada capa del camino.

Además, se asume que se trata de caminos temporales, por lo que la exigencia será menor que en el caso de caminos permanentes. Si se está diseñando un camino troncal o permanente se recomienda aumentar la exigencia que aquí se propone.

6.1 Valores de Evd mínimos aceptados

La compactación de geomateriales consiste en la eliminación de los vacíos que se encuentran dentro del depósito de suelo. Esta disminución de los vacíos se puede expresar como una disminución de la porosidad del material, o como un aumento de la densidad del mismo. El agua que se encuentra al interior de los vacíos saturándola total o parcialmente tendrá que ser movilizada durante el proceso de compactación. Es por esto que la humedad del material y su permeabilidad serán parámetros que también influyen en la compactación de los geomateriales.

Dados los factores que afectan la compactación de los geomateriales es conveniente establecer valores mínimos aceptables de acuerdo al tipo de material que se encuentra presente. Una forma adecuada para expresar esta diferencia consiste en referirla al porcentaje de finos que presentan un tamaño bajo los 0,0064 mm. Este porcentaje se expresa en peso y corresponde a las partículas que pasan la malla #200.

De acuerdo a la discusión de los resultados presentada en el capítulo anterior. Las plataformas compactadas en diferentes fundos presentan módulos de deformación menores a los propuestos en la Tabla 6.1. Esto se puede deber principalmente a la cantidad de fino que presentan. Al tratarse de suelos arcillosos, es complejo obtener grados altos de compactación mediante métodos tradicionales. En estos casos será necesario considerar mayores espesores de la carpeta del camino o la utilización de elementos de mejora como geotextiles o geomallas.

Tabla 6.1: Valores de referencia para la aceptación de la compactación de caminos de acuerdo al porcentaje de fino del material utilizado

	Compactación Proctor	Módulo de Deflexión Estático EV2	Módulo de Deflexión Dinámico Evd
	[%]	[Mpa]	[Mpa]
Gravas y arenas con < 7 % de finos	100	100	50
	97	70	35
Gravas y arenas limpias	100	80	40
	97	60	32
Gravas y arenas con 7 -15 % de finos	100	70	35
	97	45	25
Gravas y arenas con 15-40 % de finos	97	45	25
	95	30	20

En el siguiente apartado se propone un procedimiento de ejecución del control de compactación.

6.2 Procedimiento y requerimientos de ejecución del control de compactación

El método propuesto para ejecutar el control de compactación consta de dos partes. La primera parte consiste en establecer un tramo de camino de prueba de 30 m de longitud. Y la segunda parte consiste en el control mismo a lo largo del camino.

6.2.1 Tramo de prueba

Lo que se busca con el tramo de prueba es establecer la capacidad máxima de compactación que posee un terreno (plataforma), o carpeta en particular. Este tramo de prueba se deberá ejecutar por cada tipo de suelo

encontrado y por cada configuración de carpeta propuesta.

Los pasos a seguir son los siguientes:

1. En un camino nuevo, se escoge un tramo de prueba de 30 m el cual se compacta de manera tradicional hasta 4 pasadas de rodillo.

2. En ese momento se ejecuta una serie de ensayos de PCD distribuidos en toda la longitud del camino compactado. Se recomienda la ejecución de por lo menos 10 ensayos de PCD.

3. Una vez ejecutados los ensayos se procede a realizar una pasada adicional de rodillo.

4. En seguida se vuelven a ejecutar 10 ensayos de PCD. Estos nuevos resultados se comparan con los obtenidos en después de la cuarta pasada de rodillo y se obtienen la diferencia entre ambos. Es conveniente utilizar valores de deflexión (en mm) en vez de valores de módulo, para realizar la comparación.

5. Se repiten los pasos 3 y 4 hasta obtener una diferencia lo suficientemente pequeña entre dos pasadas.

Debido a que lo que se busca obtener es la respuesta del terreno a ser compactado, este procedimiento permite optimizar la cantidad de pasadas de rodillo ya que llega un momento en que continuar compactando no aporta una mejora considerable en la respuesta del terreno.

El valor aceptable para dejar de pasar el rodillo debe ser evaluado en terreno una vez que se cuente con una base de datos adecuada. Como un primer valor a considerar se recomienda que la diferencia entre una medición y la siguiente sea menor al 5%. Este valor puede aumentar o disminuir de acuerdo a lo que se observe en terreno.

Con este procedimiento se obtienen dos resultados importantes. En primer lugar, se determina la cantidad de pasadas de rodillo óptima para ejecutar la compactación y en segundo lugar se determina un valor promedio para el módulo de deformación o para la deflexión a ser requerido en el resto de la compactación del camino.

A modo de control y en una primera etapa se recomienda realizar un ensayo de placa de carga estática para validar los resultados del EVD medidos con la PCD con el EV2 de la PCE.

6.2.2 Control de compactación

El posterior control de compactación del camino se puede realizar cada 30 m a lo largo de todo el camino compactado.

En una primera etapa, se recomienda continuar realizando ensayos proctor y de densidad in-situ, para validar los resultados obtenidos mediante PCD. Se espera que con el tiempo y la acumulación de información se pueda ir reduciendo rápidamente la cantidad de ensayos de densidad in-situ requeridos.

Con este procedimiento se espera obtener con claridad el estado del camino compactado y los sectores que requieren mayor atención por presentar condiciones particularmente deficientes.

La rapidez de ejecución del ensayo de PCD permite ensayar varios km de camino en una sola jornada, esto se logra ya que el ensayo tiene una duración de no más de 5 minutos por punto.

6.2.3 Requerimientos a tener en cuenta

El equipo de PCD podrá ser utilizado con pendientes máximas del 6%, además el tamaño máximo de las partículas a ensayar debe ser de 63 mm.

Los resultados obtenidos consideran los primeros 40 a 60 cm de camino, por lo tanto, al tener carpetas de espesores menores, lo que se está consiguiendo es evaluar el camino en su conjunto y no solamente el material de carpeta del camino. Eso es una gran ventaja si lo comparamos con el ensayo de densidad in-situ que solo evalúa los primeros 10 a 15 cm de la carpeta.

Otro resultado importante que se puede obtener mediante la PCD es la posibilidad de recompactación. Ya que se realizan 3 ensayos de los cuales se obtiene un promedio, es posible comparar los valores medidos de deflexión del terreno en cada uno de esos 3 ensayos. Es posible por lo tanto obtener curvas separadas, es decir deflexiones cada vez menores. Esto es un indicio de que el terreno aún tiene una capacidad de ser recompactado aplicando poca energía de compactación. Se recomienda realizar esta recompactación cada vez que sea posible incluso si los valores obtenidos son aceptables.

7. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Se ejecutan más de 200 ensayos de placa de carga dinámica (PCD), en diferentes caminos forestales de Forestal Mininco. Se analizan los resultados obtenidos y se propone una metodología para el control de compactación de los mismos en terreno.

Se puede conlcuir que el equipo PCD, es factible de ser utilizado en el control de compactación de caminos forestales. Además de permitir la evaluación de diferentes metodologías de mejoramiento de caminos como PROES, geomallas y geosintéticos.

Debido a que los caminos no son homogéneos con la utilización de la PCD se puede medir la heterogeneidad de la compactación. detectando, de manera detallada, las zonas del camino que se deben mejorar. Esto tanto para caminos nuevos como utilizados previamente, es decir, se puede realizar un seguimiento al estado del camino para detectar los sectores de los caminos que están prontos a fallar (mantención predictiva, no correctiva).

El equipo de PCD ahorra tiempo, por lo que se puede aumentar el número de mediciones y acelerar los procesos constructivos ya que no requiere de esperas ni de ensayos de laboratorio. Todo el control y la toma de decisiones se puede realizar en terreno.

El control realizado con la PCD a diferencia del cono de arena, permite comprobar el camino en su totalidad ya que evalúa los primeros 40 a 60 cm de camino. Además, se trata de un equipo amigable con el medio ambiente.

8. REFERENCIAS

ASTM E2835-11. Standard Test Method for Measuring Deflection using a Portable Impulse Plate Load Test Device; 2007

Asli C, Feng Z, Porcher G y Rincent J. Back-calculation of elastic modulus of soil and subgrade from portable falling weight deflectometer measurements. *Engineering Structures* 2012; 34:1-7

Benedetto A, Tosti F y Di Domenico L. Elliptic model for prediction of deflections induced by a Light Falling Weight Deflectometer. *Department Sciences of Civil Engineering, University Roma Tre, Via Vito Volterra, 60, 00146 Rome, Italy. Elsevier Ltd*; noviembre 2011

Börgel, R. (1983). Geomorfología. Colección Geografía de Chile, Tomo II. Instituto Geográfico Militar, Santiago.

Coghlan G. (1999). Opportunities for low-volume roads. Transportation in the Millennium: state of art and future directions. Transportation Research Board, National Research Council, TR News 205. p. 1–7.

Fernández C. Ensayo de placa de carga dinámica de 300 mm de diámetro. *Boletín de la asociación de laboratorios acreditados de la comunidad de Madrid*; diciembre 2006, p. 1-8.

George K.P. (2003). Falling Weight De ectometer for estimating subgrade resilient moduli. Final report. Department of Civil Engineering, University of Mississippi. 113 p.

Gosk W. (2016). Stiffness Estimation of the Soil Built-in Road Embankment on the Basis of Light Falling Weight Deflectometer Test. *Procedia Engineering* 2016*; 143:395*-402

Otálvaro I, Nanclares F. Elementos para obtener el módulo de reacción de subrasante. *Dyna* 2009; 76:81-89

Ruiz J, Vaz C, Delgado G y Estaca M. Caracterización de plataformas existentes para alta velocidad mediante ensayo de carga vertical con placa dinámica. *Jornadas Hispano-Portuguesas sobre Geotecnia en las Infraestruturas Ferroviárias Madrid*; 2009

RVS 08.03.04. Compaction Test by means of the Dynamic Plate Load Test. *Austrian Research Association Road Rail Traffic (FSV*); 2008

Tompai Z. Conversion between static and dynamic load bearing capacity moduli and introduction of dynamic target values. *Periodica Plytechnic, Civil Engineering* 2008; 52:97-102

Thomas R y Fernández C. Equipo ligero de impacto para el ensayo de placa de carga dinámica de 300 mm de diámetro. *Journal of chemical information adn modeling* 2013; 54:1689-1699

TP BF-StB Part B 8.3. Dynamic plate pressure test with the help of the light drop weight device. FGSV (Forschungsge-sellschaft für Straßen-und Verkehrswesen); 2003.

Uusitalo J. (2010). Introduction to forest operations and technology. JVP Forest Systems Oy, Finland. 287 p.