

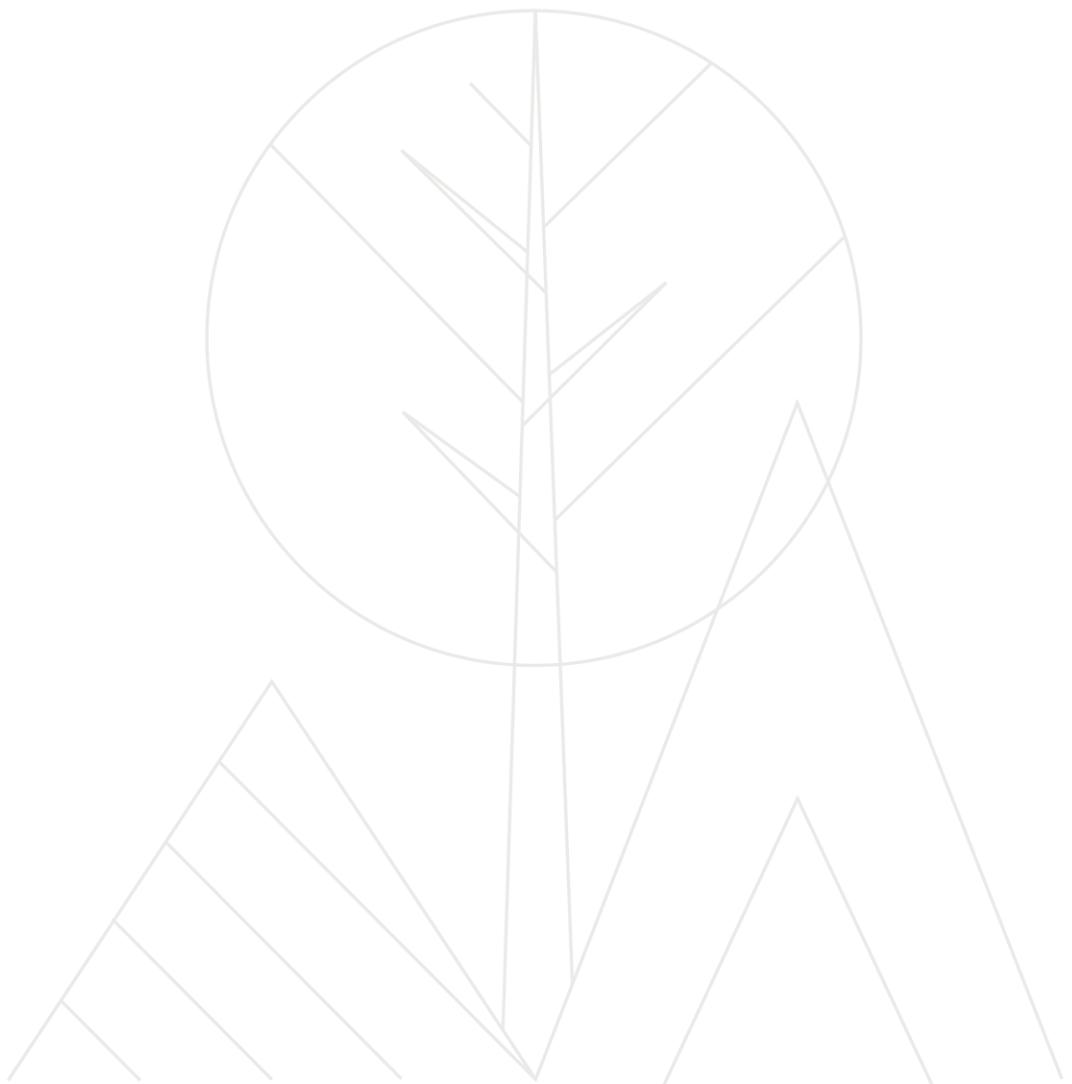
# MANUAL DE DISEÑO DE CAMINOS FORESTALES

---



**arauco**

renovables para una vida mejor



## Índice de Contenidos

Introducción .....	7
1. Aspectos generales de la operación forestal.....	8
2. Alcance del Manual .....	11
2.a. Usuarios del Manual .....	11
2.b. Objetivos y funciones del Manual .....	11
2.c. Planificación de la construcción de caminos .....	11
2.d. Proceso de diseño de un camino .....	12
3. Diseño geométrico y de habilitación .....	15
3.a. Objetivo del diseño geométrico .....	15
3.b. Vehículos de diseño .....	15
3.c. Parámetros a considerar .....	17
3.c.i. Distancias máximas de madereo según tipo de equipo .....	17
3.c.ii. Anchos de fajas .....	18
3.c.iii. Anchos de plataforma y carpetas .....	19
3.c.iv. Dimensiones de canchas, viraderos y ensanches .....	20
3.c.v. Pendientes longitudinales máximas .....	32
3.c.vi Radios de curvatura mínimos y sobreanchos asociados .....	33
3.d. Taludes .....	34
3.e. Restricciones .....	37
3.f. Diseño (Software) .....	37
4. Diseño drenaje.....	41
4.a. Objetivos del drenaje .....	41
4.b. Cómo afecta el agua a un camino .....	41
4.c. Drenaje superficial .....	44
4.d. Drenaje interno.....	44
4.e. Elementos para realizar drenaje.....	44
4.f. Ubicación y dimensionamiento de alcantarillas .....	53
4.g Obras Complementarias .....	53
5. Diseño estructural .....	57
5.a. Objetivos del diseño estructural .....	57
5.b. Tipos de caminos .....	57
5.c. Metodología de diseño .....	58
5.d. Materiales y tecnologías a utilizar en el diseño estructural .....	59
5.e. Espesores de diseño .....	61
5.e.i. Selección de Variables y Parámetros.....	61
5.e.ii. Capacidad de Soporte de la Subrasante o Plataforma .....	63
5.e.iii. Tipo de estructuras.....	65
5.e.iv. Instructivo de Uso de las Cartillas .....	66
5.e.v. Cartillas de Diseño.....	73

6. Balizado y Señalización .....	84
6.a. Balizaje durante la construcción .....	84
6.b. Señalización terminada la construcción .....	85
6.c. Delineadores .....	86
6.d. Señalización durante la operación.....	89
ANEXO 1: Simulaciones de Trayectorias para definir sobreanchos en curvas.....	91
ANEXO 2: Memorias de Cálculo de Diseño .....	99

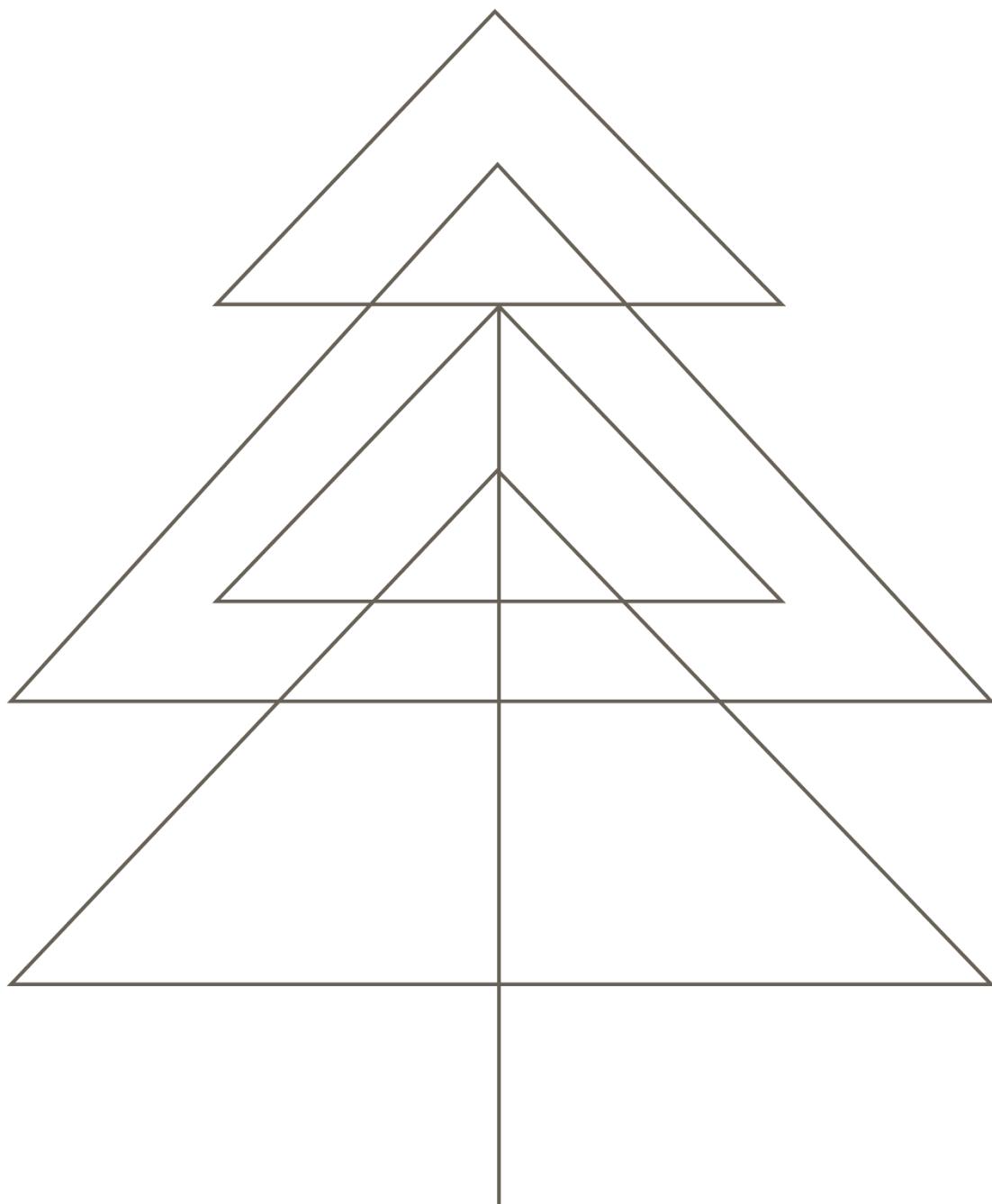
## Índice de Tablas

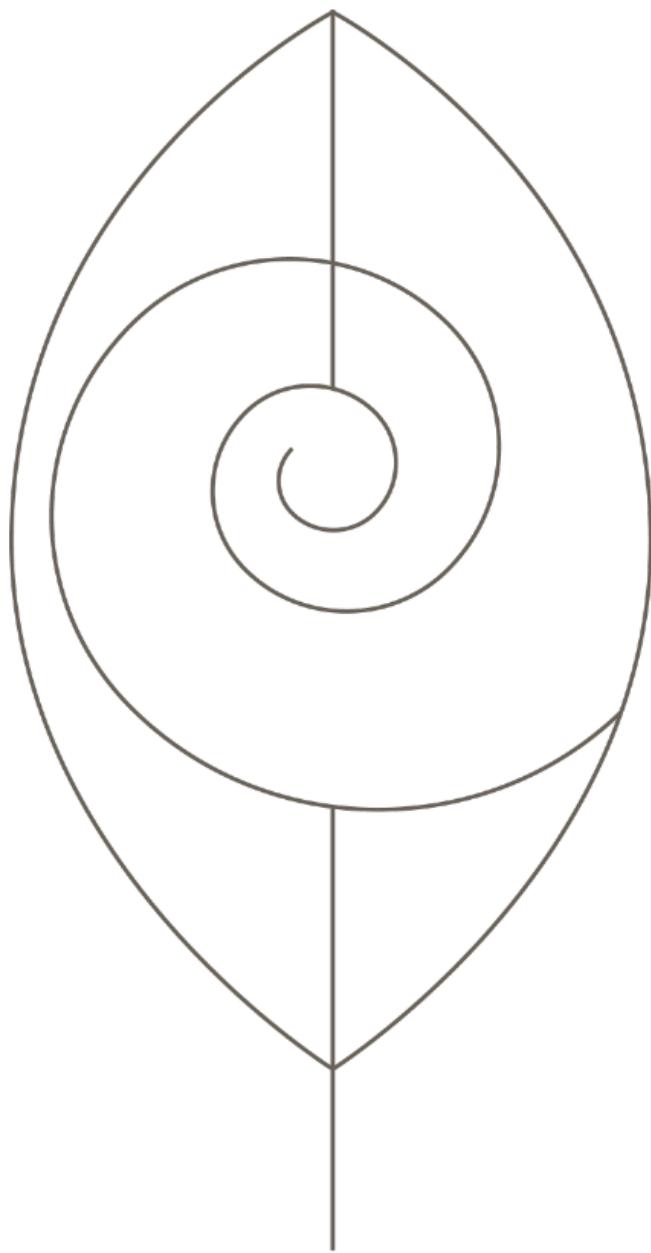
Tabla 1: Estándar de habilitación según pendiente .....	17
Tabla 2: Pendientes longitudinales máximas .....	32
Tabla 3: Sobreanchos (en metros) para distintos radios de curvatura .....	33
Tabla 4: Causas que producen inestabilidad en taludes.....	34
Tabla 5: Pendientes típicas según tipo de suelo .....	35
Tabla 6: Caudales y velocidades máximas para.....	47
Tabla 7: Velocidades máximas admisibles en canales no revestidos. ....	48
Tabla 8: Banda granulométrica material de Base Granular.....	59
Tabla 9: Requisitos de calidad para material de Base Granular .....	59
Tabla 10: Banda Granulométrica material de Subbase Granular.....	60
Tabla 11: Requisitos de calidad Subbase Granulares .....	60
Tabla 12: Rangos de metros cúbicos de madera en cartillas.....	62
Tabla 13: Rangos de CBR en cartillas.....	65
Tabla 14: Tabla precipitaciones críticas (en milímetros) .....	69
Tabla 15: Cálculo del CBR Combinado de diseño para ingresar a las cartillas .....	70

## Índice de Figuras

Figura 1: Configuración Camión remolque forestal .....	16
Figura 2: Configuración Camión semi remolque o rampa .....	16
Figura 3: Dimensiones Camión Tipo Cama Baja considerado para modelaciones de este Manual .....	17
Figura 4: Distancias referenciales para sección típica corte-derrame.....	18
Figura 5: Distancias referenciales para sección típica corte-corte .....	19
Figura 6: Ancho tipo de 4,0 metros .....	20
Figura 7: Ancho tipo 3,5m.....	20
Figura 8: Tipos de cancha según ubicación y condición topográfica. ....	21
Figura 9: Planta Cancha terminal. ....	22
Figura 10: Corte Cancha terminal. ....	22
Figura 11: Planta Cancha a orilla de camino .....	23
Figura 12: Corte Cancha a orilla de camino.....	23
Figura 13: Planta Cancha terminal plana.....	24
Figura 14: Corte A-A cancha terminal plana.....	24
Figura 15: Corte B-B cancha terminal plana .....	25
Figura 16: Planta cancha terminal con corte .....	25
Figura 17: Corte A-A cancha terminal con corte .....	26
Figura 18: Vista isométrica cancha terminal con corte .....	26
Figura 19: Planta cancha orilla de camino .....	27
Figura 20: Corte A-A cancha orilla camino .....	27
Figura 21: Corte B B cancha orilla camino.....	28
Figura 22: Planta Viradero.....	29
Figura 23: Corte A-A Viradero .....	30
Figura 24: Corte B-B Viradero.....	30
Figura 25: Planta ensanche .....	31
Figura 26: Corte ensanche.....	32
Figura 27: Terrazas en taludes con altura superior a 6,0 m .....	35
Figura 28: Influencia del agua en un pavimento, corte típico.....	44
Figura 29: Bombeos y peraltes típicos para camino forestal.....	45
Figura 30: Dimensiones de cunetas.....	46
Figura 31: Planta fosos y antefosos .....	49
Figura 32: Corte longitudinal típico foso y antefoso .....	49
Figura 33: Corte tipo para taludes con alturas inferiores a 3,0 m. ....	49
Figura 34: Corte tipo para taludes con alturas superiores a 3,0 m. ....	49
Figura 35: Disposición de disipadores de energía.....	50

Figura 36: Subdren.....	52
Figura 37: Empalizada .....	54
Figura 38: Contención o defensa.....	54
Figura 39: Corte tipo de una estructura genérica de pavimento.....	57
Figura 40: Cartilla de diseño: para la cartilla asociada a un tipo de clima, se ingresa por el tipo de suelo (S) y el volumen de madera (T) y se obtiene la solución. ....	61
Figura 41: Combinación de ejes de camión y remolque (ESRS = Eje Simple Rueda Simple, EDRD = Eje Doble Rueda Doble, ESRD = Eje Simple Rueda Doble).....	62
Figura 42: Rangos de CBR para clasificaciones de suelo USCS y AASHTO .....	64
Figura 43: Concepto de CBR combinado utilizado en cartillas de diseño .....	64
Figura 44: Tipos de estructuras utilizados en cartillas .....	66
Figura 45: Resumen de cartillas de diseño .....	67
Figura 46: Resumen del Uso de Cartillas .....	68
Figura 47: Ejemplo de aplicación del método del ingeniero para CBR de diseño de subrasante .....	72
Figura 48: Ejemplo de metros cúbicos de madera a transportar en cada camino.....	72
Figura 49: Baliza común en camino.....	84
Figura 50: Baliza tipo, inicio de camino .....	85
Figura 51: Baliza tipo, inicio y fin de cancha.....	85
Figura 52: Señalización definitiva terminada la construcción .....	86
Figura 53: Dimensiones placa señalética .....	86
Figura 54: Delineador tipo .....	88
Figura 55: Metodología diseño empírico-mecanicista .....	99





## Introducción

Como parte de la revisión permanente de los estándares de caminos forestales de Forestal Arauco y mejora continua de sus procesos, la Unidad de Caminos realiza una nueva actualización del contenido del Manual de Diseño, correspondiendo a la versión 04, la cual recoge observaciones y aspectos mencionados y analizados en conjunto con las demás Unidades Forestales.

Las principales actualizaciones y cambios con respecto a la versión 03 apuntan a los siguientes aspectos:

- Incorporación de camión semi remolque como parte de la flota de transporte.
- Aumento en sobreanchos de curvas por la incorporación de un nuevo tipo de camión a la operación de transporte forestal.
- Incorporación de nuevas dimensiones de canchas para operación mecanizada aérea, sobreanchos para cruce de camiones y cambio en los tipos y ubicación de viraderos.
- Incorporación de señalización.

Participaron directamente en esta actualización los Jefes de Camino Zonales y Jefe de Diseño y Calidad y fue aprobado por el Subgerente de Caminos.



## 1. Aspectos generales de la operación forestal

Extracto de las ideas fuerza que dan origen a este Manual:

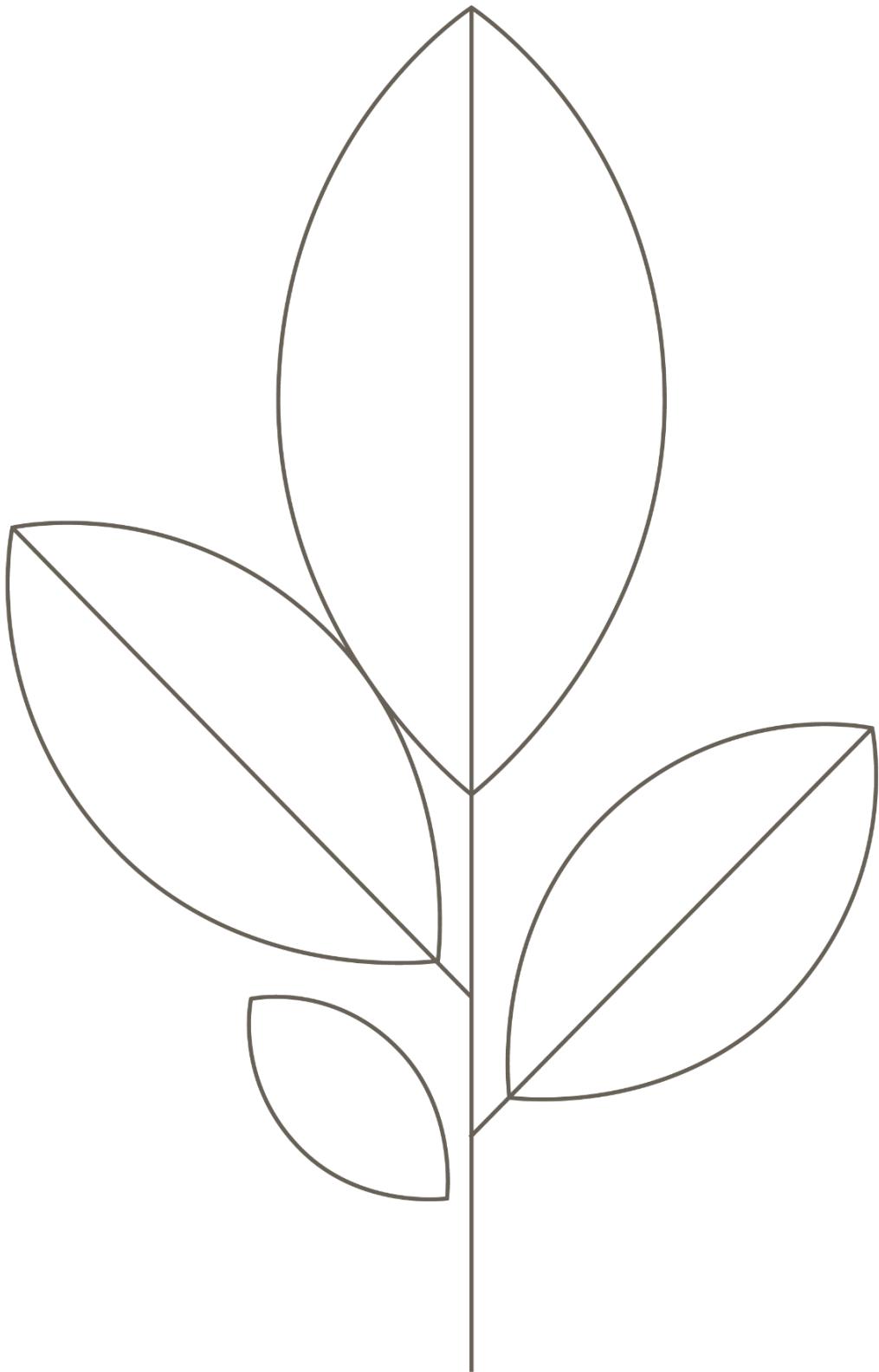
- ✓ “El suelo es el principal activo de Forestal Arauco.”
- ✓ “Los caminos son una seria disturbación operativa de este activo.”
- ✓ “Esto nos lleva a minimizar su impacto en el patrimonio, teniendo a la vista realizar operaciones de alto estándar productivo.”
- ✓ “El trazado y habilitación debe ser altamente exigente en cumplir con el menor movimiento de tierra posible, permitiendo la extracción de la totalidad de la plantación.”
- ✓ “El uso de equipos de extracción de madera acorde a la condición del terreno es clave. Los equipos deben ser los aptos para la condición de terreno y no adaptar el terreno a la condición de equipos disponibles.”
- ✓ “Se debe planificar todo el madereo a orilla de camino, eliminando las canchas de madereo, incluso de ser posible para las faenas de torre.”
- ✓ “Las prescripciones de diseño y construcción del presente manual apuntan a mejorar en forma relevante la serviciabilidad del camino.”
- ✓ Mejora continua

Jorge Serón F.



**arauco**

renovables para una vida mejor



## 2. Alcance del Manual

### 2.a. Usuarios del Manual

Los usuarios del presente Manual serán los Ingenieros de Forestal Arauco que realicen habilitación de los predios y diseño de los caminos forestales en cada una de sus instancias.

### 2.b. Objetivos y funciones del Manual

El presente Manual de diseño de caminos forestales es un documento de carácter normativo, que servirá de guía para que los Ingenieros que diseñen los caminos de producción apliquen un estándar único de diseño en las distintas Zonales que forman Forestal Arauco.

En él se establecen criterios, procedimientos y métodos, restricciones y acciones a seguir en los distintos proyectos de caminos forestales cuya finalidad es ser una herramienta para la extracción de madera.

### 2.c. Planificación de la construcción de caminos

La construcción de un camino forestal nace de la necesidad de transportar hacia el interior de predios los equipos para la cosecha y posteriormente transportar el árbol trozado y procesado fuera del bosque hacia los lugares de destino.

Para planificar un camino se debe tener en cuenta que la **solución óptima de caminos es aquella longitud de camino y cantidad de canchas que permita cosechar la totalidad del predio con los equipos disponibles al menor costo posible, con estándares de seguridad adecuados y el menor impacto ambiental y social**.

## 2.d. Proceso de diseño de un camino

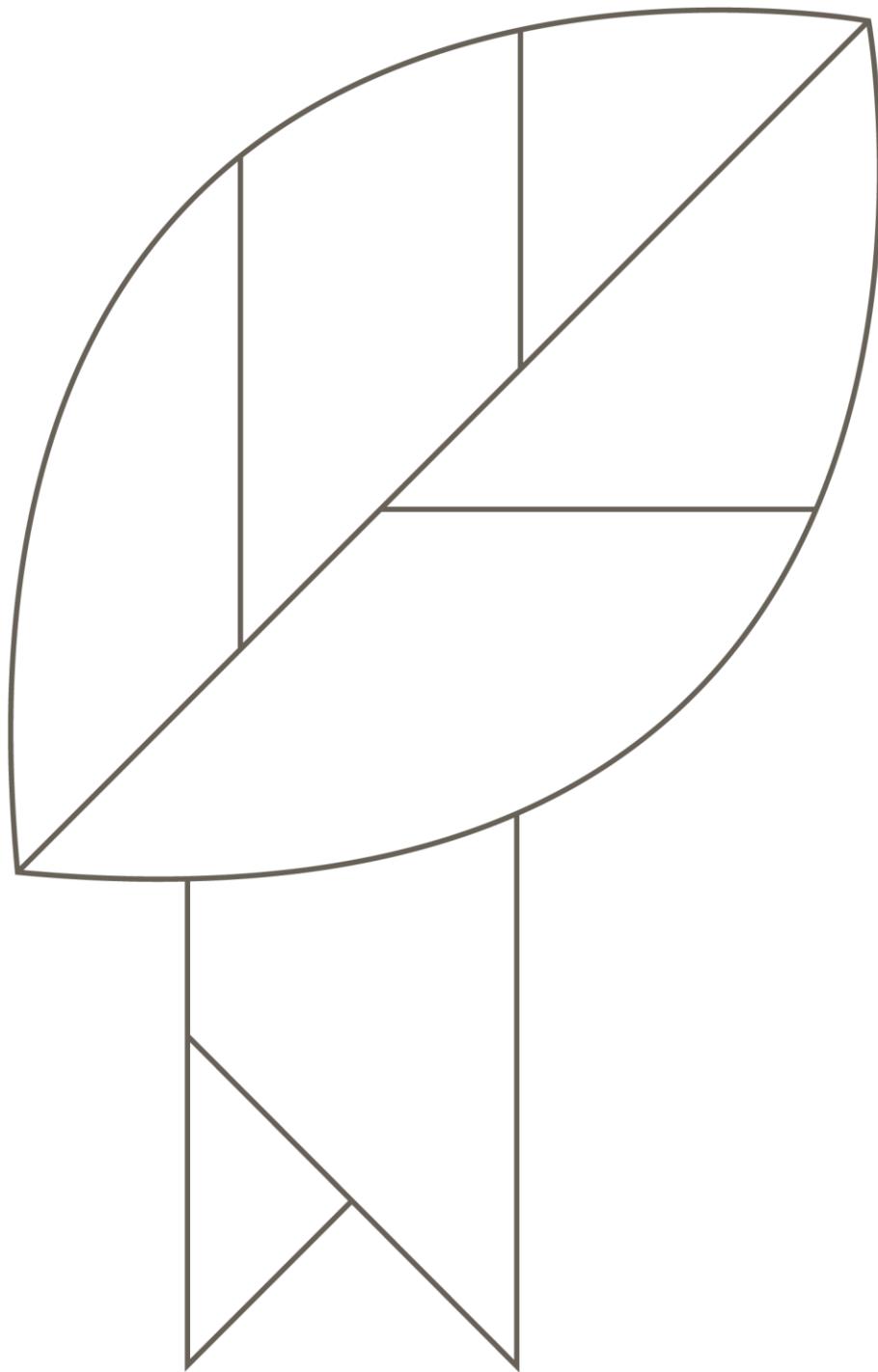
El proceso de diseño de un camino forestal tiene 3 etapas, las cuales se desarrollan en detalle en los capítulos siguientes de este Manual.

1. Diseño geométrico y de habilitación, realizado en una primera etapa a través de un software de trazado y posteriormente una validación y caracterización detallada en terreno por medio de un trazador.
2. Diseño de alcantarillas y obras complementarias, cuya ubicación en planta y dimensionamiento se realiza a través de un software y luego se valida y corrige en terreno, de ser necesario, desde un punto de vista de las restricciones dadas y desde el punto de vista del impacto que producirá el cambio en los cursos naturales de agua. Posteriormente se proyectan las zonas con cunetas, fosos, antefosos y subdrenes.
3. Diseño estructural, esta etapa se realiza con las cartillas de diseño para distintas condiciones de entrada (Tránsito, clima, suelos).

Se incluye una cuarta etapa que consiste en la señalización mínima con la que deberán contar los caminos forestales para una operación más segura, estableciéndose los criterios para su ubicación.







### 3. Diseño geométrico y de habilitación

#### 3.a. Objetivo del diseño geométrico

Los caminos son obras tridimensionales, cuyos elementos quedan definidos mediante las proyecciones sobre los planos ortogonales de referencia: Planta, Elevación y Sección Transversal.

El elemento básico para tal definición es el eje longitudinal de la vía, cuyas proyecciones en planta y elevación definen la planta y el alzado respectivamente.

Estos ejes en planta y alzado deben cumplir con una serie de normas y recomendaciones para asegurar transporte, acceso y seguridad, manteniendo la productividad.

Lo anterior, sumado a la definición de la sección transversal tipo, constituye el diseño geométrico de un camino.

En el ámbito forestal, el camino cumple la función de habilitar zonas de un predio para que los equipos de cosecha puedan acceder a la extracción de madera del bosque y posteriormente se pueda realizar el transporte de dicha madera a destino, por tanto, las normas y recomendaciones para el diseño geométrico de los caminos forestales están íntimamente ligadas a la optimización de la etapa de planificación de un predio, instancia en que se definen las áreas y equipos para cosechar.

#### 3.b. Vehículos de diseño

Los usuarios principales y para quienes se debe diseñar geométricamente el camino corresponden al camión con remolque forestal y al camión semi-remolque o camión rampa, los cuales componen la flota que extraerá la madera. En la Figura 1 y Figura 2 se presentan las configuraciones típicas de estos camiones.

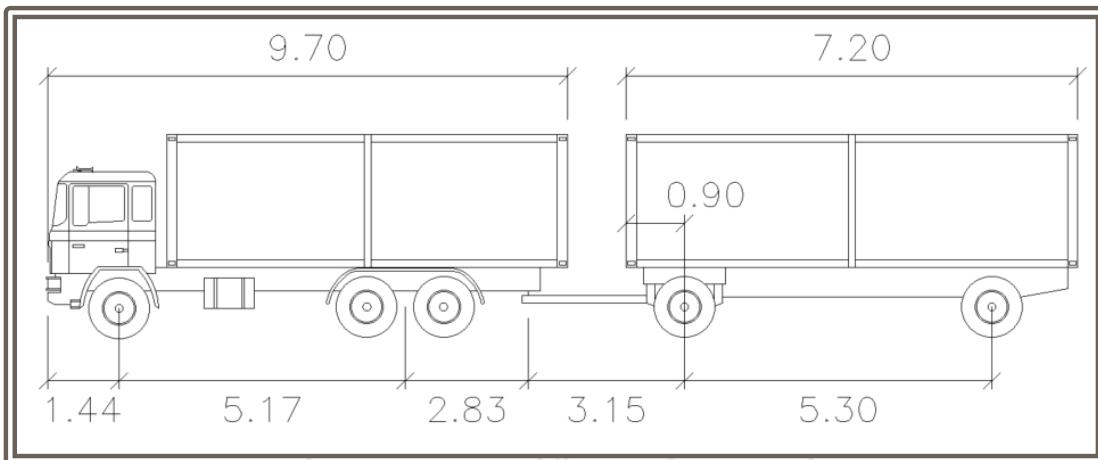


Figura 1: Configuración Camión remolque forestal

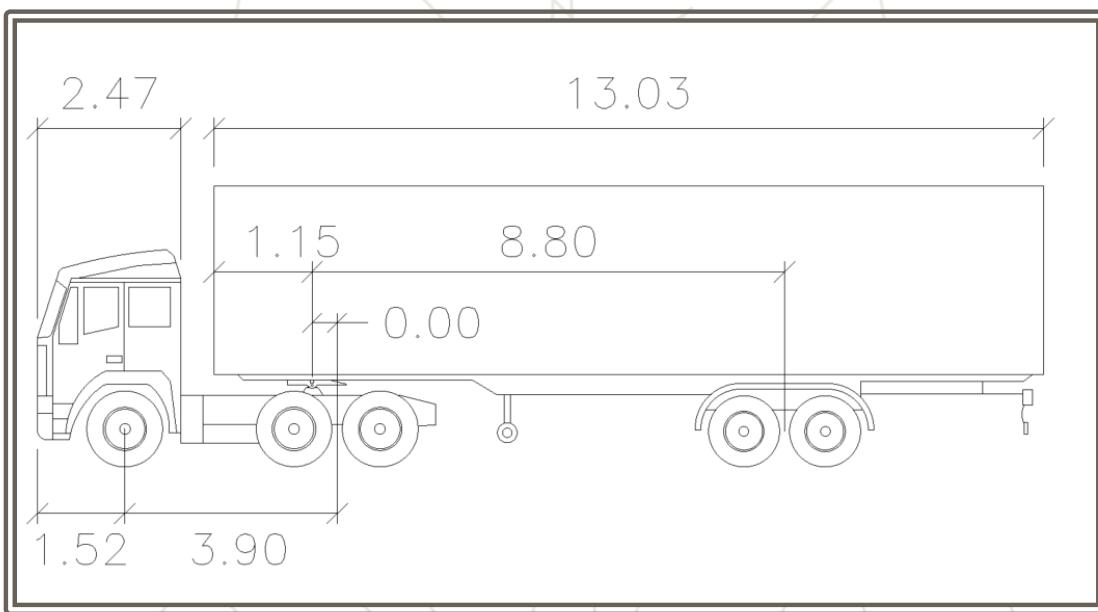


Figura 2: Configuración Camión semi remolque o rampa

Adicionalmente, los caminos son utilizados por camiones tipo cama baja (Figura 3), los cuales se utilizan para transportar a los equipos de cosecha hacia los puntos del predio que se requieran.

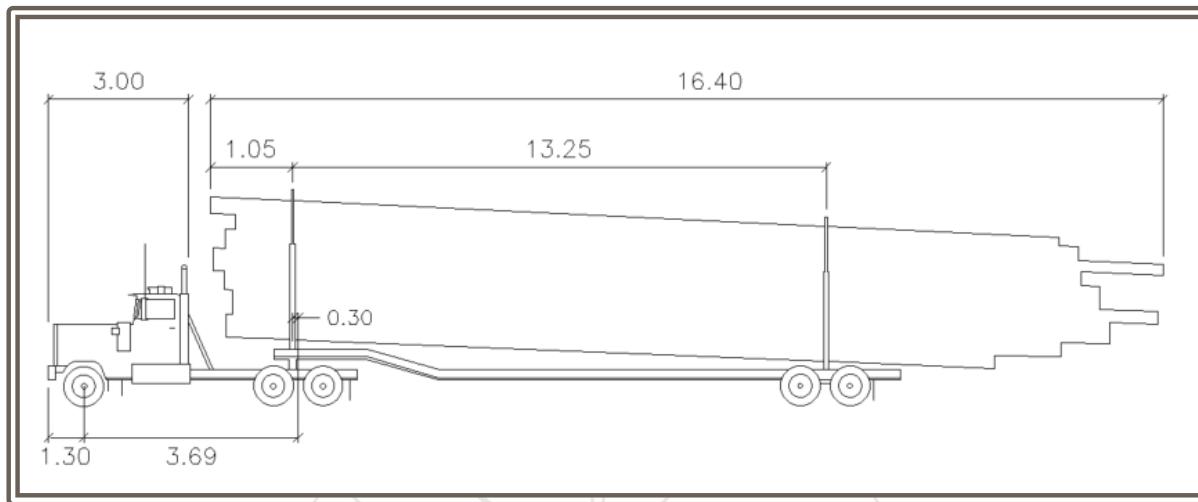


Figura 3: Dimensiones Camión Tipo Cama Baja considerado para modelaciones de este Manual

### 3.c. Parámetros a considerar

#### 3.c.i. Distancias máximas de madereo según tipo de equipo

La distancia de madereo es el primer parámetro que se necesita evaluar. Para ello es necesario conocer los equipos disponibles para la cosecha y sus restricciones técnicas. La distancia máxima de madereo a considerar es 500 metros.

Los estándares de habilitación que deberán cumplirse al realizar los pretrazados son:

Tabla 1: Estándar de habilitación según pendiente  
(Fuente: elaboración propia)

Pendiente (%)	Habilitación (Ha/km)
Alta pendiente (> 30%)	22
Media pendiente (15% < pdte < 30%)	29
Baja pendiente (< 15%)	36

### 3.c.ii. Anchos de fajas

El ancho de faja para caminos, en recta y en horizontal, se fijará en 12 metros, dando cabida con ello a todos los elementos necesarios a usar en la plataforma, según indican las Figura 4 y Figura 5.

En caso de sobreanchos (curvas), ensaches (cruce de camiones) o viraderos, este ancho en horizontal para apertura de fajas indicado en 12.0 metros, aumenta según las condiciones de terreno.

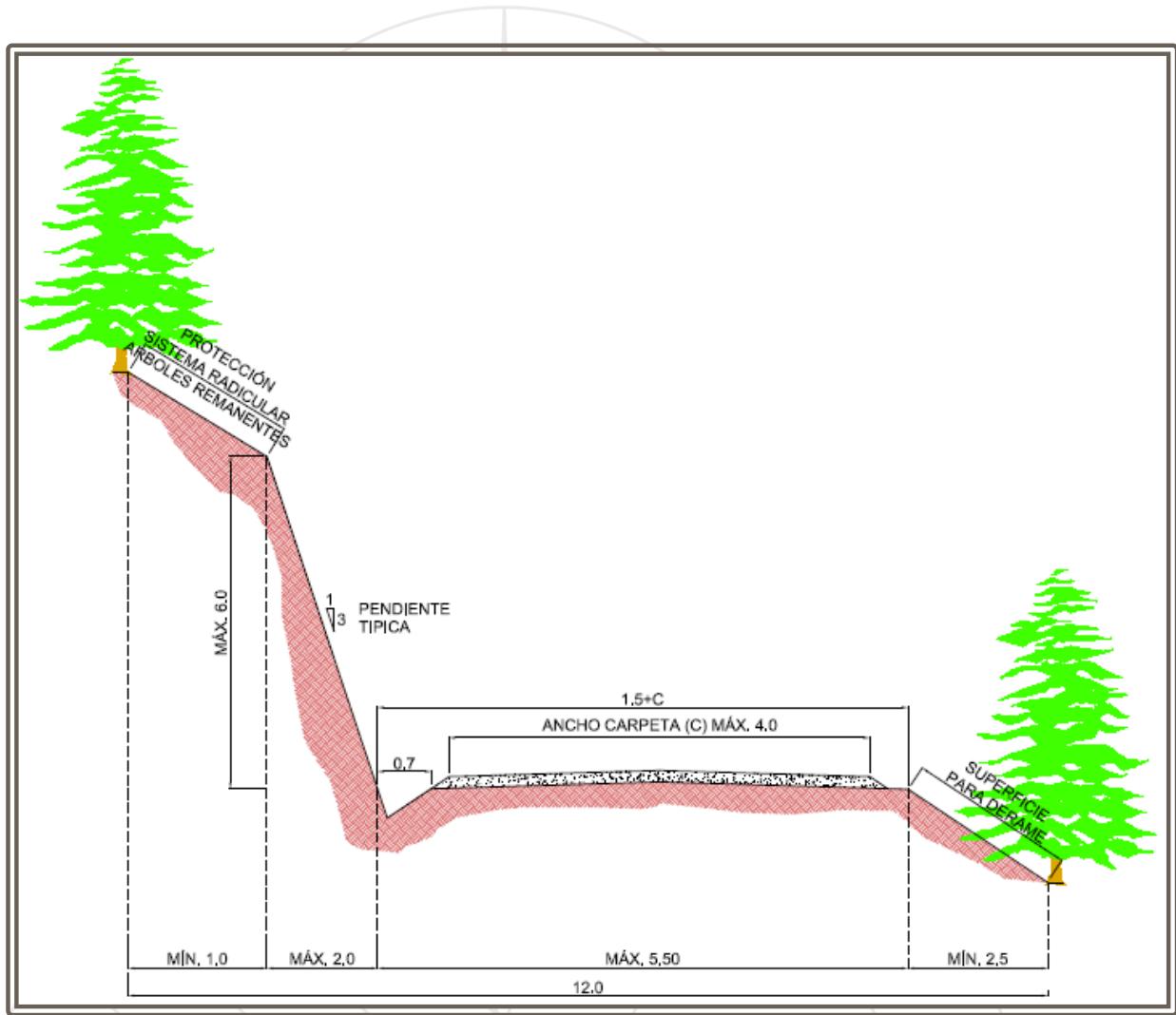


Figura 4: Distancias referenciales para sección típica corte-derrame

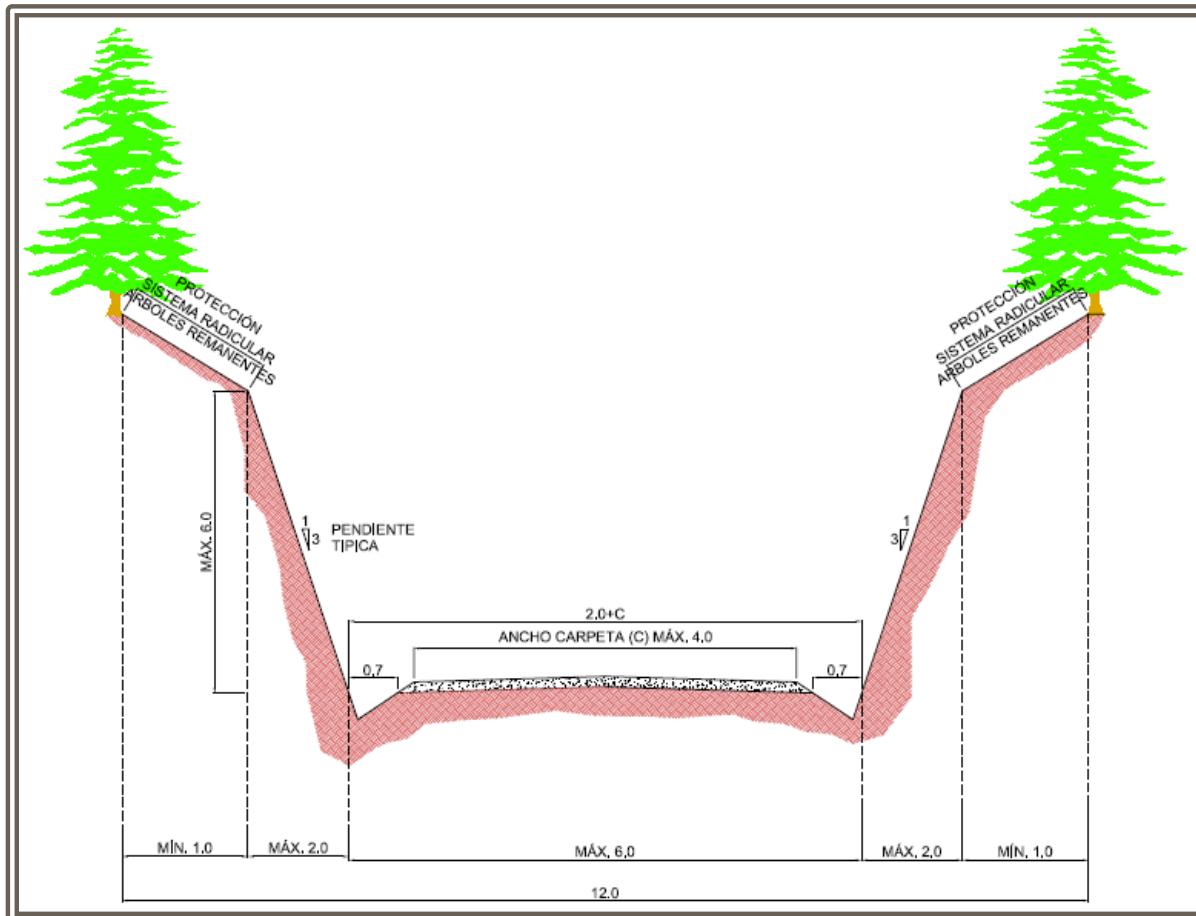


Figura 5: Distancias referenciales para sección típica corte-corte

### 3.c.iii. Anchos de plataforma y carpetas

Los anchos de plataforma serán 5,5 metros cuando el perfil se encuentre en corte y derrame y 6,0 metros cuando el perfil esté en doble corte según muestran las Figuras 4 y 5, del punto 3.c. ii.

Para caminos que consideren carpeta granular, por seguridad y según modelación que indica una menor posibilidad de ahuellamiento, se fijó el ancho de carpeta granular en 4,0 metros para caminos donde la solicitud de tránsito sea superior a 5.000 m<sup>3</sup> de madera. Para volúmenes inferiores a 5.000 m<sup>3</sup> el ancho de carpeta será de 3,50 metros.

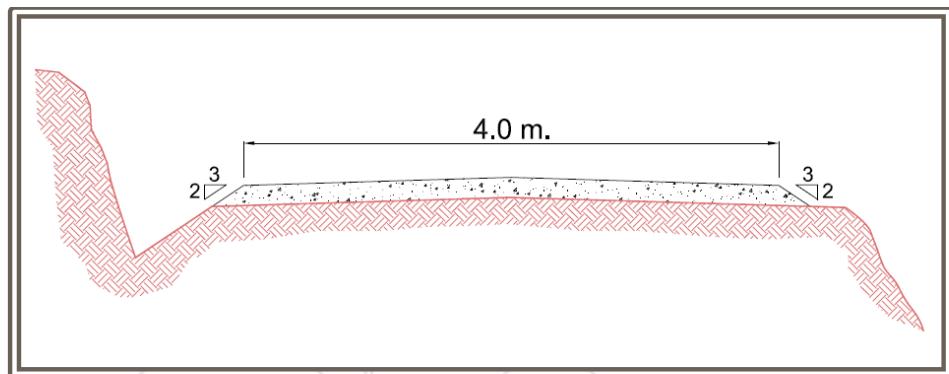


Figura 6: Ancho tipo de 4,0 metros.

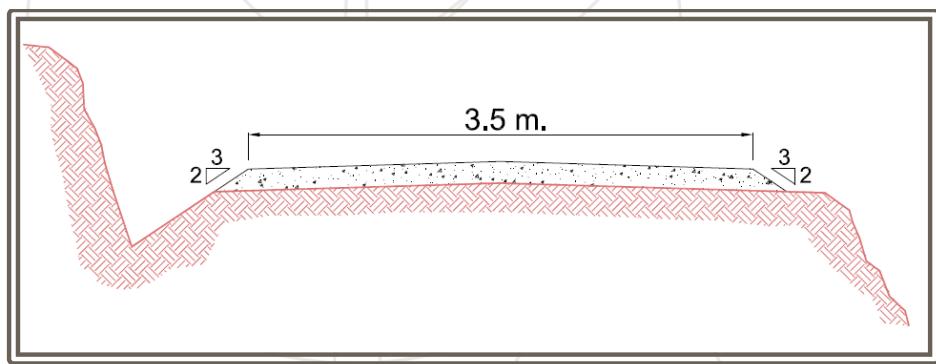


Figura 7: Ancho tipo 3,5m

#### 3.c.iv. Dimensiones de canchas, viraderos y ensanches:

Las **canchas** que se diseñarán son sólo para habilitación de cosecha de bosque con torre, no habrá otro tipo de canchas.

Se establecen 5 tipos de canchas, dependiendo de la condición topográfica de su ubicación y de la configuración y tipos de equipos de cosecha (Figura 8):

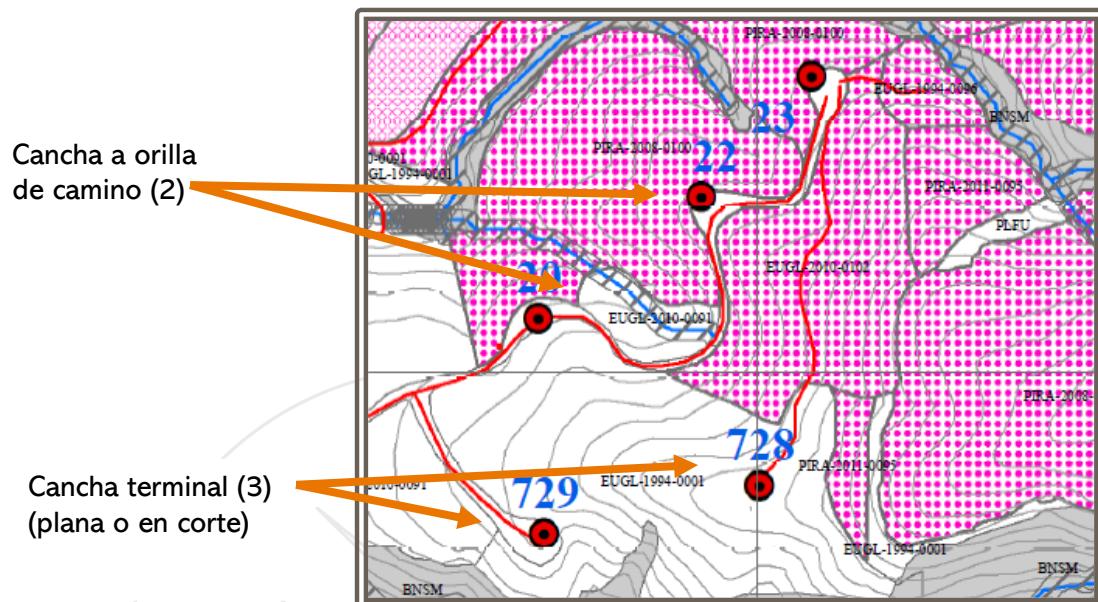


Figura 8: Tipos de cancha según ubicación y condición topográfica.

Las dimensiones límite de las canchas para operaciones de cosecha aérea mecanizadas son las indicadas en la Figura 9 y Figura 11, es decir:

- 30m x 34m en movimiento de tierra; si se requiere carpeta de ripio, las dimensiones de esta carpeta serán 28m x 32m
- 50m x 20m en movimiento de tierra, si se requiere carpeta de ripio, las dimensiones de esta carpeta serán 48m x 18m

Por aspectos de seguridad, que indican que 2/3 del árbol debe estar dentro de la cancha y para optimizar el movimiento de tierra, **se podrán utilizar dimensiones intermedias entre las indicadas**, asegurando que la superficie útil final sea de aproximadamente 1.000 m<sup>2</sup> en movimiento de tierra y, si requiere de ripio, éste sea de una superficie útil entre 860 m<sup>2</sup> y 900 m<sup>2</sup>. (En lo posible estas canchas se construirán 100% en corte firme, de no ser factible esta situación por el excesivo movimiento de tierra generado, se tolerará hasta un máximo de 30% de la superficie en derrame).

### Cancha Terminal faena mecanizada:

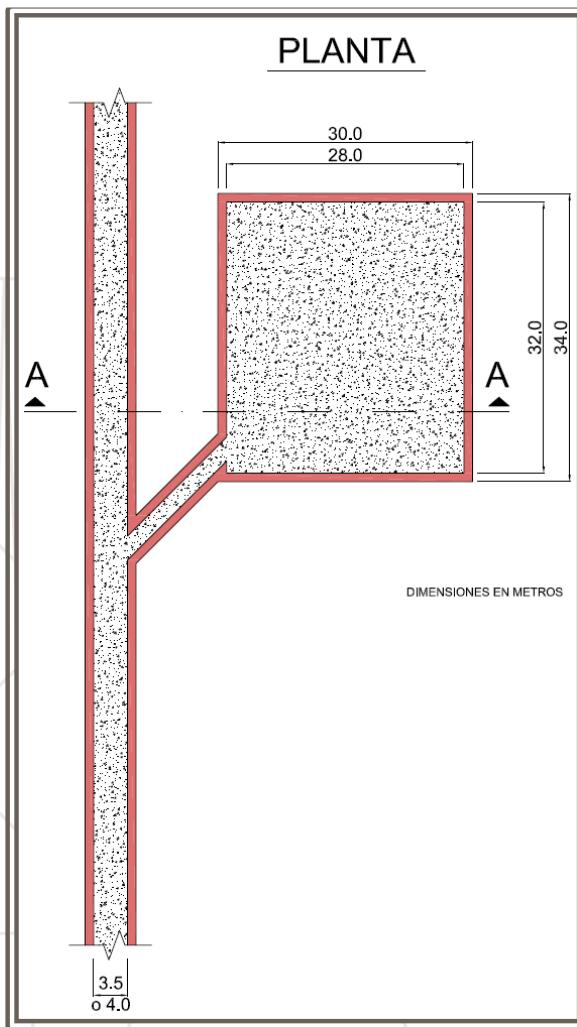


Figura 9: Planta Cancha terminal.

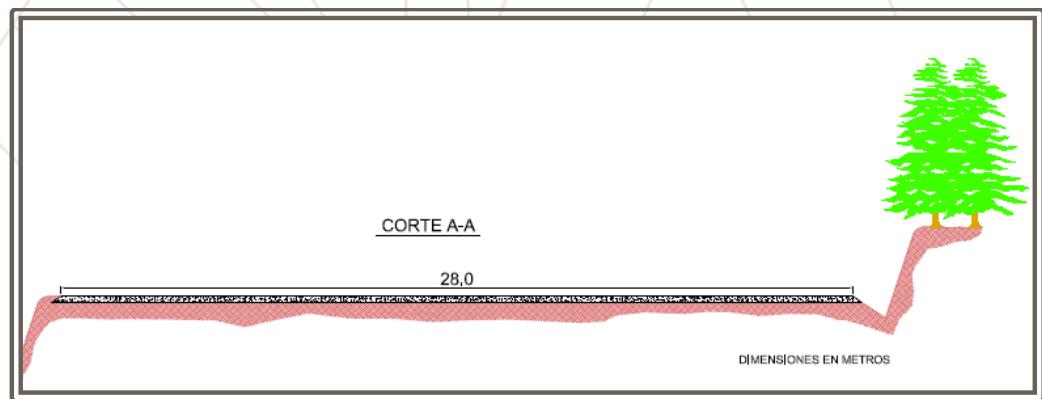


Figura 10: Corte Cancha terminal.

### Cancha a orilla de camino faena mecanizada:

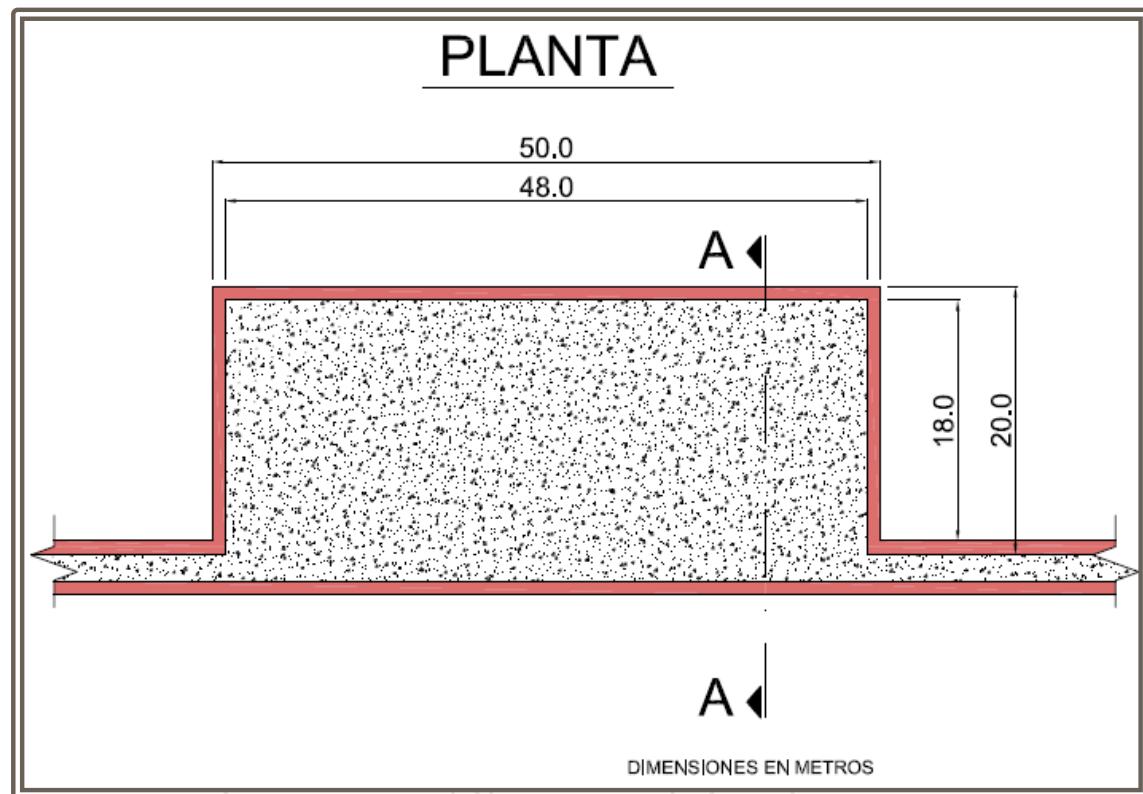


Figura 11: Planta Cancha a orilla de camino

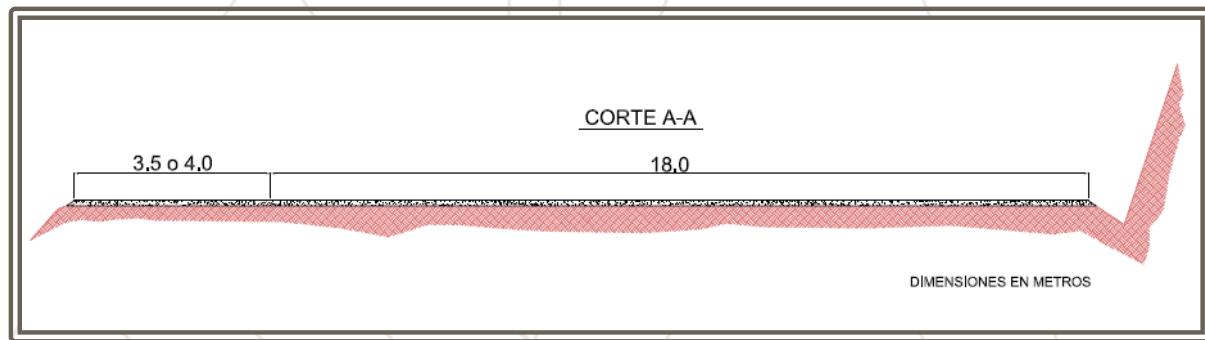


Figura 12: Corte Cancha a orilla de camino

Las canchas para configuraciones de equipos para cosecha aérea full mecanizada se construirán **completamente en corte firme** y sus dimensiones son las indicadas en las Figuras 13, 16 y 19.

Cancha Terminal plana - faena full mecanizada:

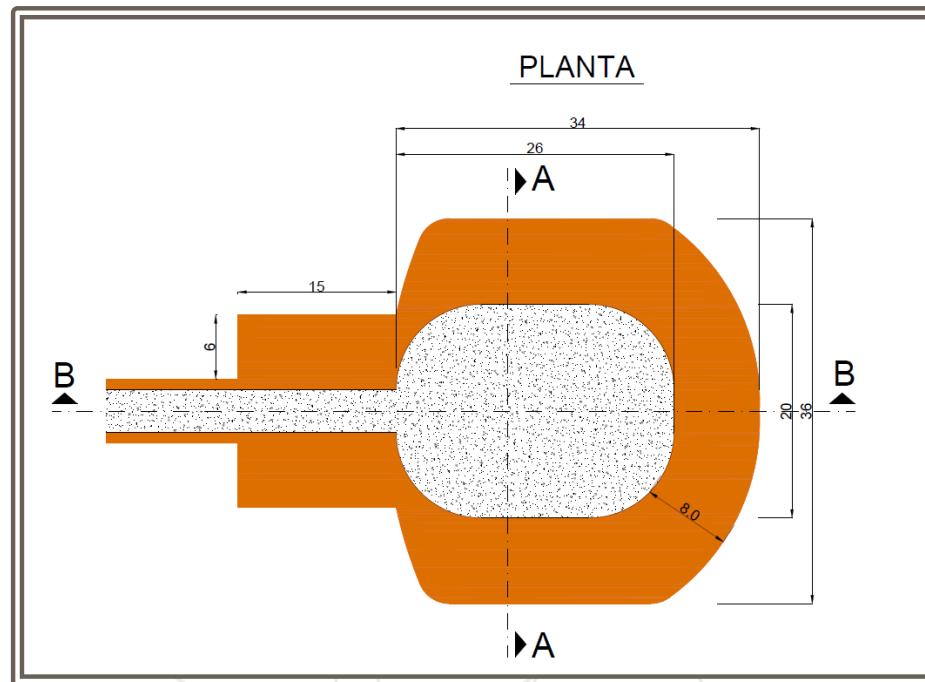


Figura 13: Planta Cancha terminal plana

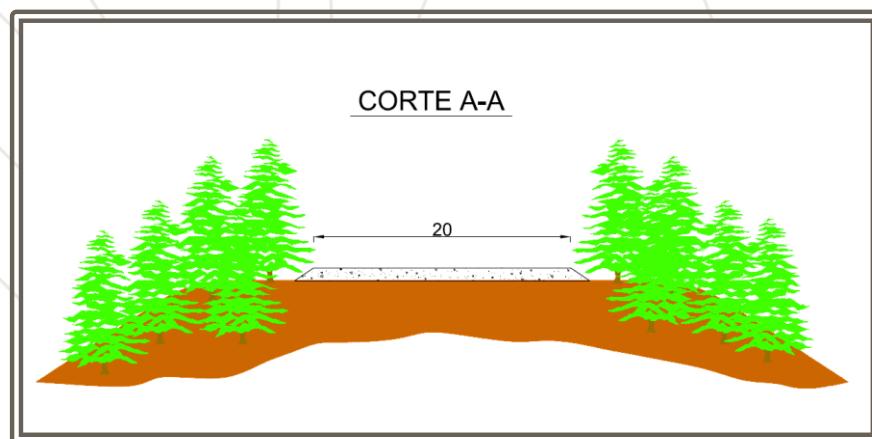


Figura 14: Corte A-A cancha terminal plana

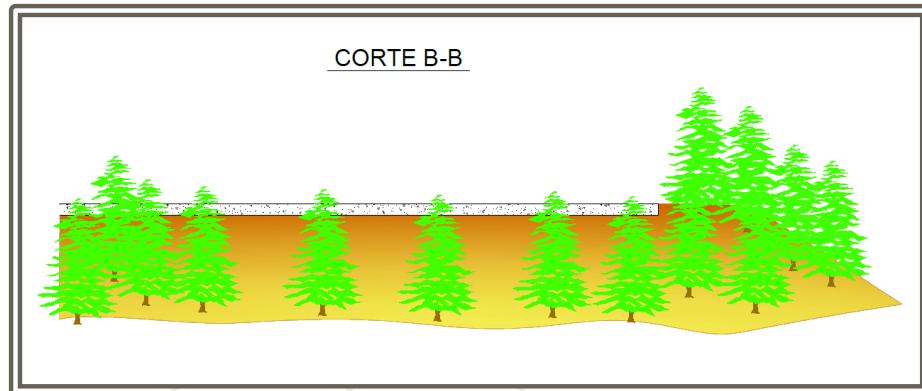


Figura 15: Corte B-B cancha terminal plana

#### Cancha Terminal con corte – faena full mecanizada:

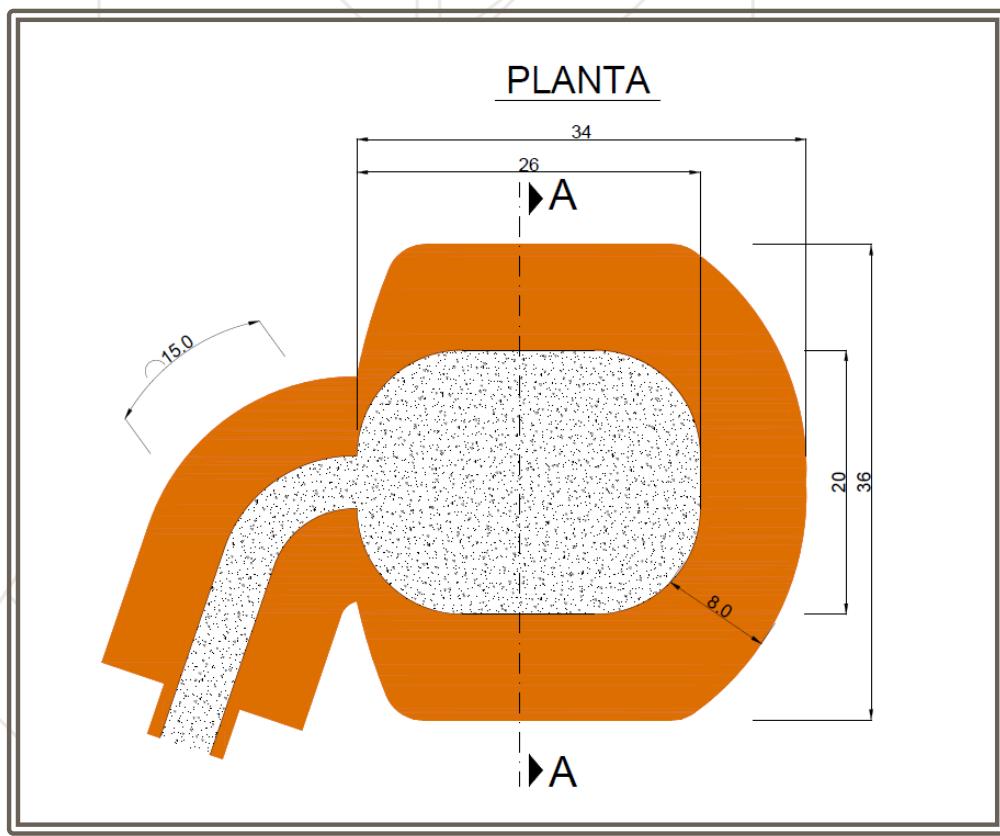


Figura 16: Planta cancha terminal con corte

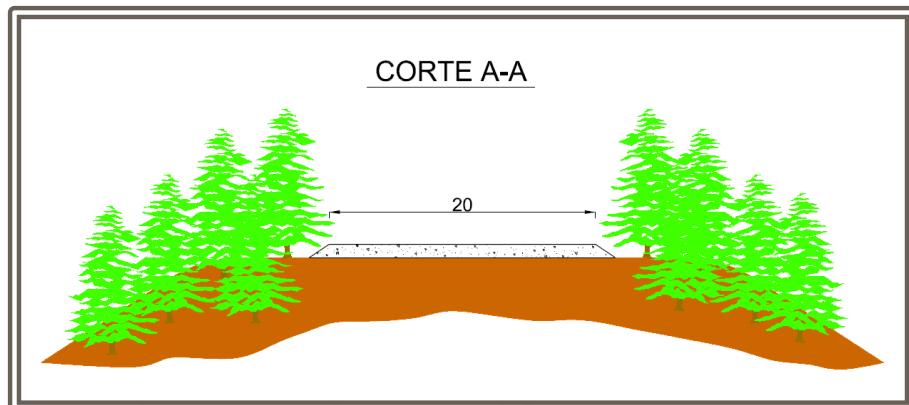


Figura 17: Corte A-A cancha terminal con corte

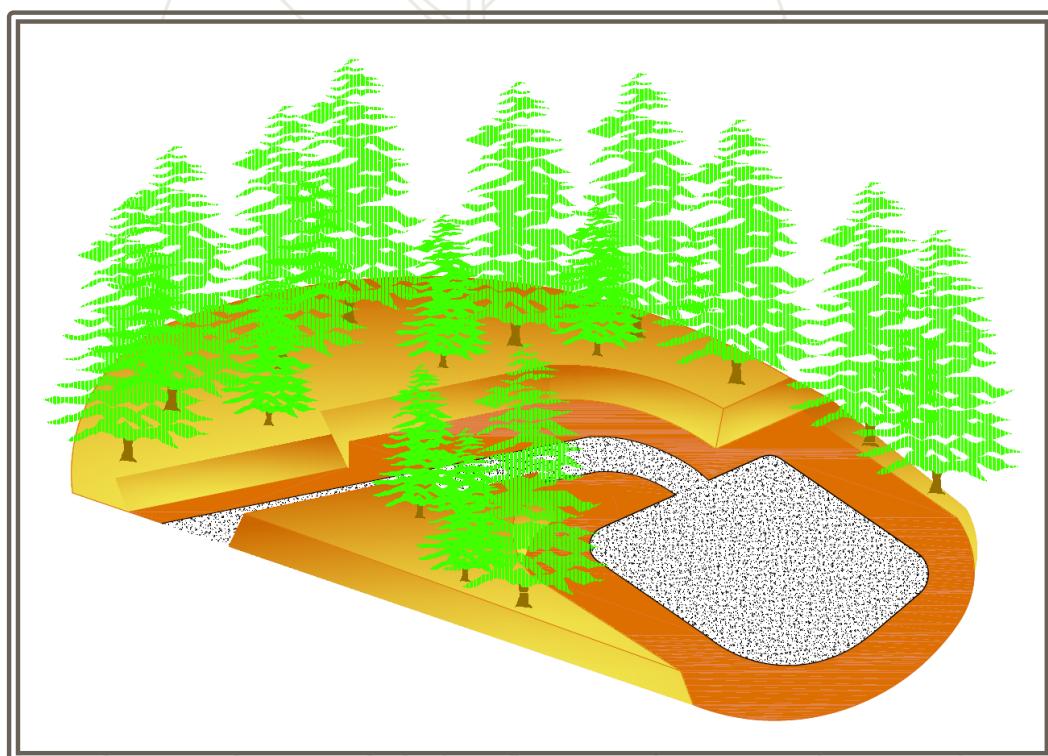


Figura 18: Vista isométrica cancha terminal con corte

### Cancha orilla de camino – faena full mecanizada:

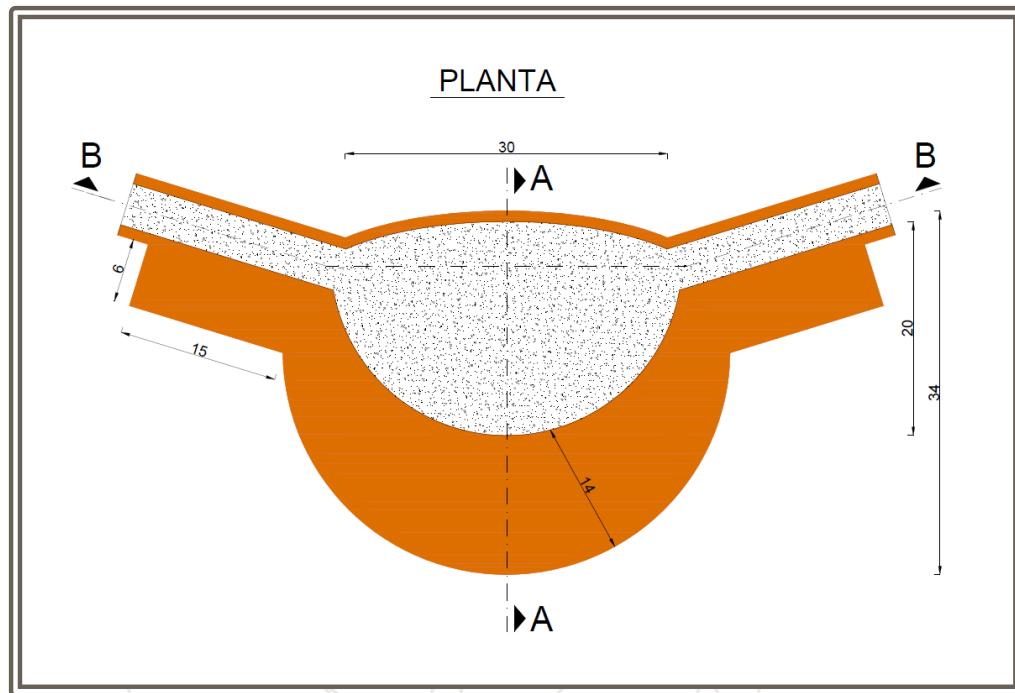


Figura 19: Planta cancha orilla de camino

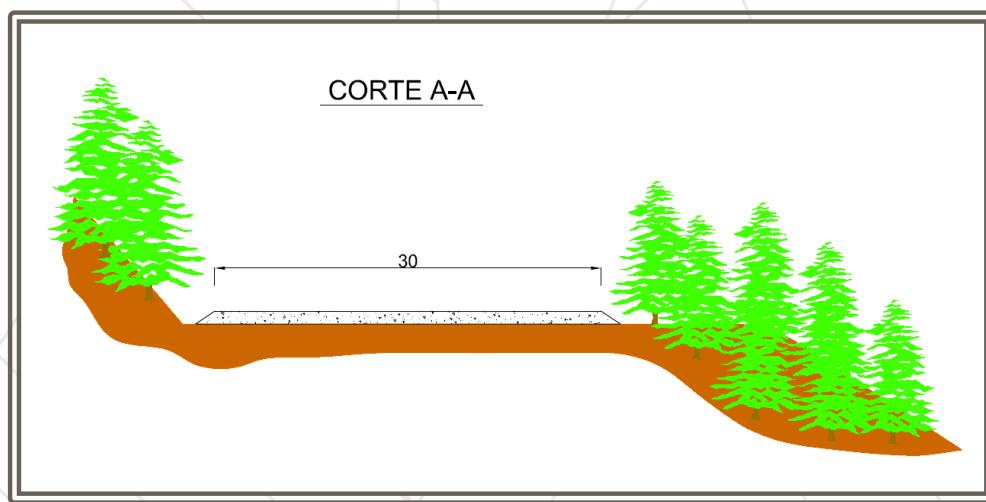


Figura 20: Corte A-A cancha orilla camino

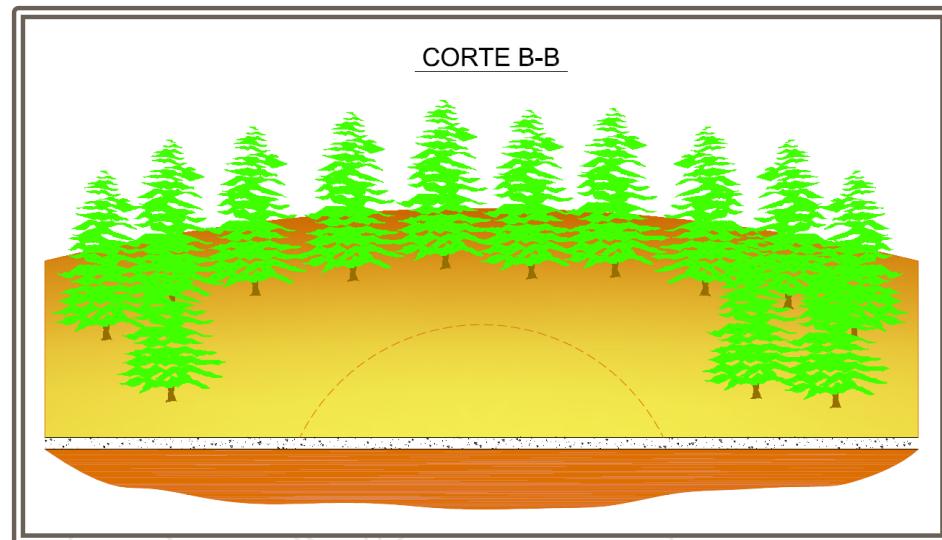


Figura 21: Corte B-B cancha orilla camino

En los accesos a las canchas full mecanizadas desde donde se operará para acceder a los sectores preparados para el arrumado, la carpeta deberá ser reforzada estructuralmente. La superficie que abarca este refuerzo será definida en terreno de acuerdo con las condiciones particulares de cada predio, debiendo abarcar al menos el sector frente a la zona de arrumado y parte del ingreso a la cancha.



Los **viraderos** son superficies que se utilizan para el giro de los camiones en aquellas zonas donde no hay canchas ni áreas que permitan esta maniobra.

Por lo tanto, se construirán viraderos **sólo en los caminos con oferta de cosecha terrestre** de acuerdo con los siguientes criterios:

- Los viraderos serán semicirculares intermedios y terminales, según Figura 22.
- Se construirán cada 500 metros, considerando una holgura para trazado de  $\pm 100$  metros.
- En caminos con pendientes transversales de 0% a 15%, los empalmes de caminos serán considerados como viraderos, considerando una superficie mínima de 300 m<sup>2</sup>.
- No hay restricción de pendiente longitudinal para su ubicación, dentro de los estándares de pendiente indicados en el presente Manual, dando preferencia a las zonas con pendientes más suaves.
- La restricción para alturas de corte de los taludes serán las mismas que para las canchas nuevas, es decir 10,0 metros.
- Todo empalme pre-existente en terrenos de baja pendiente transversal (0% a 15%) podrá ser ampliado y utilizado como viradero.

Las superficies involucradas en los viraderos, corresponden a:

- Movimiento de Tierra : 330 m<sup>2</sup>
- Ripio : 265 m<sup>2</sup>

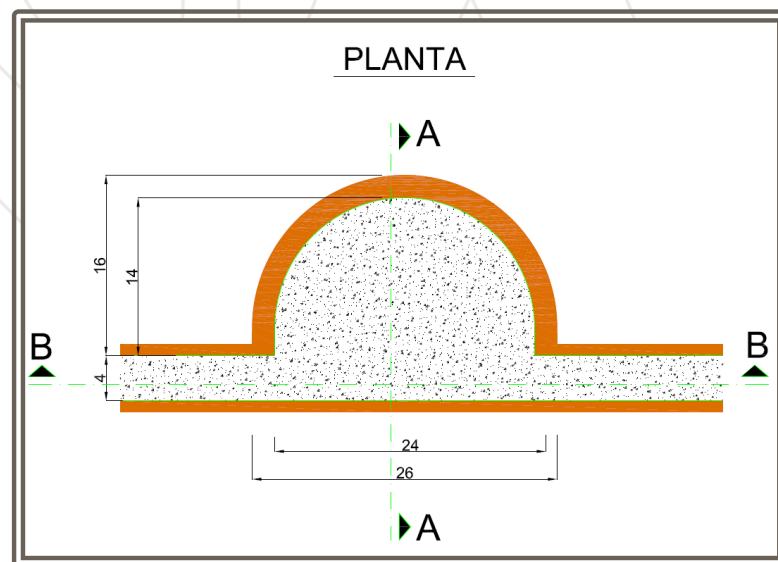


Figura 22: Planta Viradero.

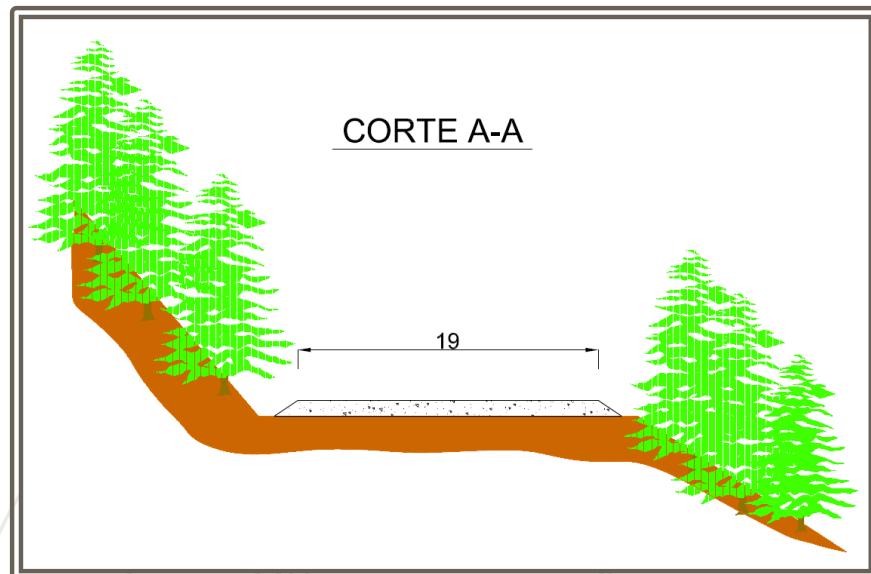


Figura 23: Corte A-A Viradero

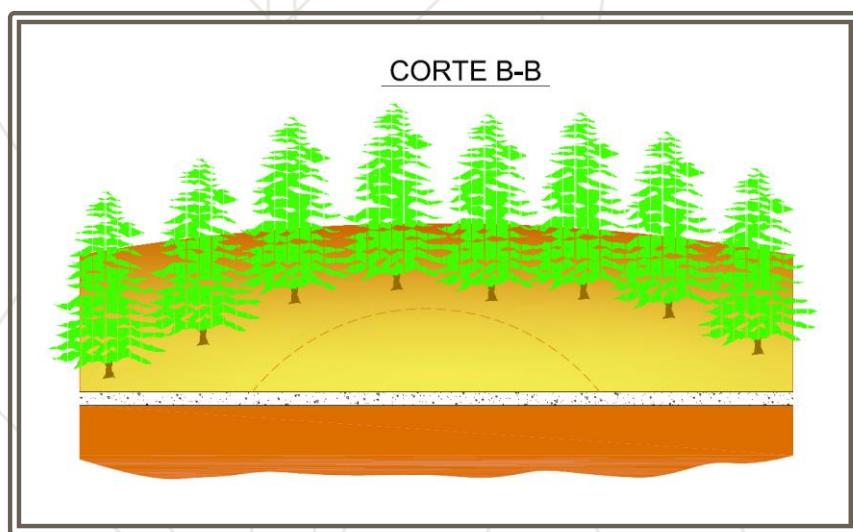


Figura 24: Corte B-B Viradero

Los **ensanches** tienen como objetivo permitir el cruce de camiones en caminos bidireccionales.

Se construirán a una distancia máxima de 500 metros ( $\pm 100$  m holguras de trazado), siempre que no exista algún lugar que permita el cruce de camiones con seguridad.

Todo empalme pre-existente en terrenos de baja pendiente transversal (0% a 15%) podrá ser ampliado y utilizado como ensanche.

Las dimensiones de los ensanches para poner carpeta de ripio son 40 m x 4 m (Figura 25 y 26). El movimiento de tierra de los ensanches debe considerar, un metro adicional a las dimensiones de la carpeta de ripio.

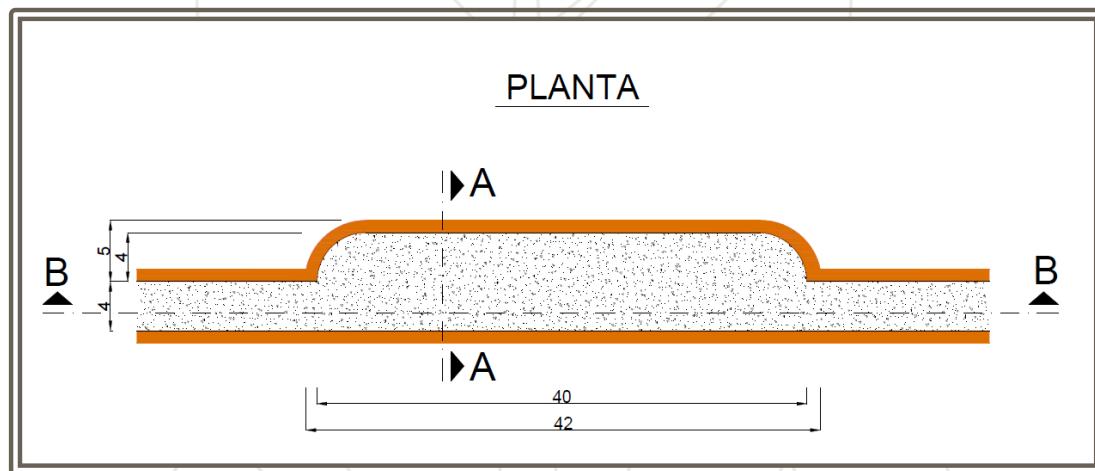


Figura 25: Planta ensanche

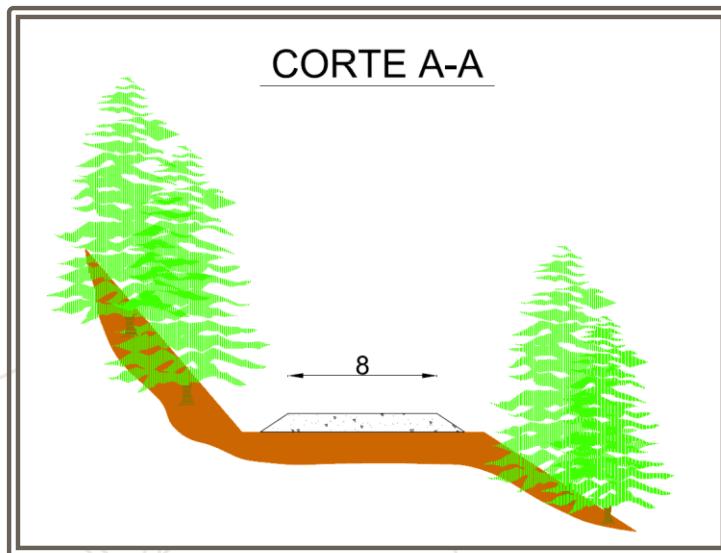


Figura 26: Corte ensanche

### 3.c.v. Pendientes longitudinales máximas

Para mantener una velocidad de operación mínima de 20 km/hr, no sobreexigir la carpeta de rodado, y mantener un nivel de seguridad adecuado, se han fijado pendientes máximas para el trazado longitudinal, las que se resumen en la Tabla 2: Pendientes longitudinales máximas.

Tabla 2: Pendientes longitudinales máximas  
(Fuente: Elaboración propia)

	Pendientes en contra (%)	Pendiente a favor (%)	Observaciones
Caminos nuevos	10	12	
Caminos existentes	12	14	En longitud máxima 100 metros. Situaciones especiales, evaluación con SSO y Transporte.
Curvas	7		

### 3.c.vi. Radios de curvatura mínimos y sobreanchos asociados

Los radios mínimos de curvatura, bajo el criterio de seguridad ante el deslizamiento lateral, dependen de la velocidad de diseño, el peralte máximo y el coeficiente de fricción transversal máximo correspondiente a la velocidad de diseño, y se relacionan según la expresión:

$$R_m = \frac{V_p^2}{127 (\rho_{máx} + t_{máx})}$$

Donde:

$R_m$  : Radio Mínimo Absoluto (m)

$V_p$  : Velocidad Proyecto (km/h)

$\rho_{máx}$  : Peralte Máximo correspondiente al Camino (m/m)

$t_{máx}$  : Coeficiente de fricción transversal máximo correspondiente a  $V_p$ .

Como radio mínimo absoluto para los trazados forestales se adoptó el valor de 15 m y a partir de este valor se realizaron simulaciones de trayectoria de un tipo de camión cama baja para obtener los sobreanchos necesarios en curva (se consideraron las dimensiones indicadas en la Figura 3. Ver Anexo 1 con simulaciones de trayectorias).

Los sobreanchos adoptados en carpetas de ripio, para carpetas de 4,0 metros, según las simulaciones realizadas para el camión tipo cama baja considerado se muestra en Tabla 3, este mismo sobreancho debe considerarse para el movimiento de tierra.

Tabla 3: Sobreanchos (en metros) para distintos radios de curvatura  
(Fuente: Elaboración propia)

Radio de curvatura (m)	Curva en 90°	Curva en 120°	Curva en 180°
15	4,5	5,5	6,5
25	3,0	3,5	3,5
45	1,5	2,0	2,0
60	1,0	1,0	1,0
90	--	--	--

El desarrollo del sobreancho deberá iniciarse 25 metros antes del inicio de la curva y terminar 25 metros después del fin de curva, de forma que el sobreancho se alcance en todo el desarrollo de la curva.

### 3.d. Taludes

La seguridad de una masa de tierra contra la falla o movimiento es lo que se define como estabilidad.

La inestabilidad ocurre cuando la resistencia al corte del suelo es excedida por los esfuerzos de corte que se producen en una superficie relativamente continua.

La falla puede ser el resultado de cualquiera de estos factores, aislados o combinados.

Tabla 4: Causas que producen inestabilidad en taludes.

(Fuente: Elaboración Propia)

Causas que producen aumento de esfuerzos	Causas que producen disminución de la resistencia
<ul style="list-style-type: none"><li>- Cargas externas como edificios o nieve.</li><li>- Aumento del peso de la tierra por aumento de la humedad.</li><li>- Remoción por excavación de parte de la masa de tierra.</li><li>- Presión de agua en las grietas de tracción.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Presión de agua intersticial</li><li>- Destrucción de la estructura del suelo por vibración o actividad sísmica.</li><li>- Deterioro del material cementante.</li><li>- Pérdida de la tensión capilar por secamiento.</li></ul>

El término “deslizamiento de tierras” se asocia a una serie de procesos que resultan en el movimiento de un talud.

Dado que no es posible controlar todas las variables mencionadas en ningún proyecto, se asumirá como pendiente típica para evaluación de los proyectos de caminos la razón 1H:3V para los taludes en cortes. Una vez ejecutado el movimiento de tierra dentro de un predio, en aquellos taludes de más de 2,0 metros de altura que visiblemente se aprecien suelos inestables se evaluará la condición y se podrá rectificar su inclinación según análisis particular y valores referenciales típicos recomendados por la literatura y mostrados Tabla 5 o se podrá realizar alguna obra complementaria.

Tabla 5: Pendientes típicas según tipo de suelo  
(Fuente: Elaboración propia)

Textura	Cortes
Limos, Arcillas limosas y arcillas no consolidadas	3H : 2V
Arcillas limosas y arcillas consolidadas	1H : 1V
Arenas cementadas, arenas y gravas	3H : 4V

Para caminos nuevos la altura máxima de un talud será de 6,0 metros. Si por condiciones puntuales, debidamente justificadas y con la seguridad correspondiente para ejecutar las obras se debiese trabajar con alturas mayores, se deberán construir terrazas de 1,0 metro con pendiente hacia el interior de 1,5%, según se muestra en Figura 27, cautelando siempre una operación segura para el equipo de construcción.

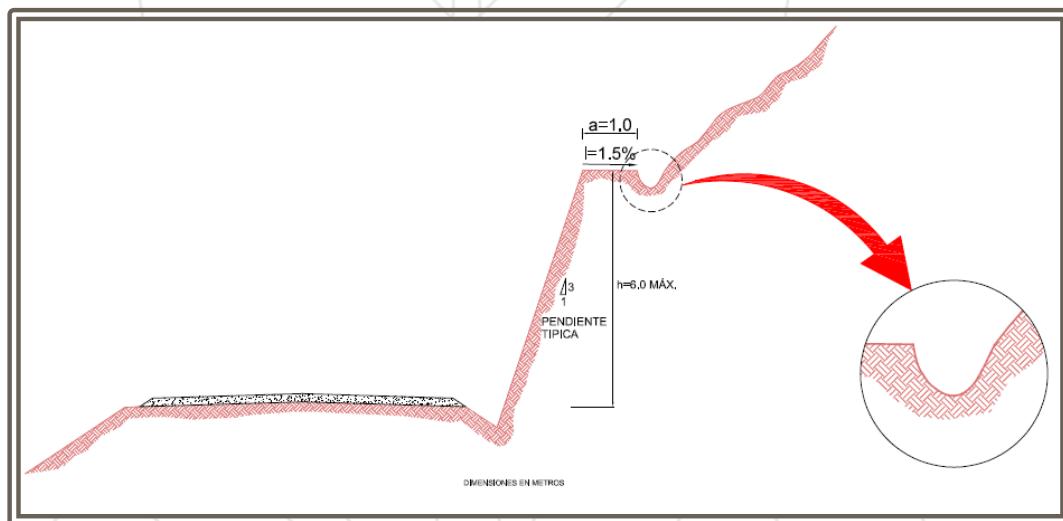


Figura 27: Terrazas en taludes con altura superior a 6,0 m

Para el caso de **caminos existentes, incluidos aquellos que deban ser ensanchados**, podrán aceptarse alturas de talud superiores sin necesidad de terrazas, siempre que los suelos visiblemente entreguen la estabilidad necesaria para mantener esa altura y se puedan realizar obras de saneamiento (fosos) en los coronamientos de los taludes.

Cuando se tengan suelos con condiciones de estabilidad muy baja y erosionables, se podrán considerar medidas puntuales complementarias: suelos estabilizados mecánicamente, drenajes intermedios, contrafosos y/o contenciones.

En todas las canchas nuevas se restringirá la altura máxima para trabajar a **10,0 metros** (asegurando que los vientos de las torres no queden colgados en aquellas que corresponda), buscando siempre minimizar el movimiento de tierra y trabajando en condiciones seguras. La pendiente típica que se adoptará será de 1:3 (H:V), ver Imagen 2.

Para el caso de canchas existentes, donde los materiales ya se han consolidado y permanecen estables para las alturas que presentan, se podrán realizar obras de saneamiento (fosos) en los coronamientos de los taludes que evacuen el agua fuera del talud.



Imagen 1: Talud de cancha

### 3.e. Restricciones

Las principales restricciones que considerar en el diseño geométrico son aquellas que se han mencionado en los puntos i, v, vi del ítem (c) y en el ítem (d) que corresponden a:

- Distancias máximas de madereo según equipo de cosecha seleccionado
- Pendientes longitudinales máximas
- Radios mínimos de curvatura
- Pendientes y alturas de taludes

**IMPORTANTE:** Para aquellas situaciones donde no se pueda cumplir el estándar indicado por algún motivo, entre los cuales se puede mencionar:

- Presencia de bosque nativo
- Caminos antiguos existentes
- Caminos públicos, vecinales o de terceros
- Otra interferencia social, ambiental o técnica,

Que impida o dificulta de manera considerable este cumplimiento, corresponderá realizar un análisis conjunto con SSO, Medio Ambiente, Patrimonio, Transporte, Cosecha si corresponde, y Caminos de cada Zona para definir la solución particular a adoptar.

### 3.f. Diseño (Software)

La habilitación de las zonas de cosecha y diseño geométrico de los caminos se realiza por medio del software Planex.

Planex es una herramienta computacional cuyo objetivo es apoyar, facilitar y mejorar la toma de decisiones en el diseño de caminos, posicionamiento de canchas de equipos de madereo y la sectorización de la cosecha por equipo según corresponda, optimizando las utilidades generadas por estas actividades.

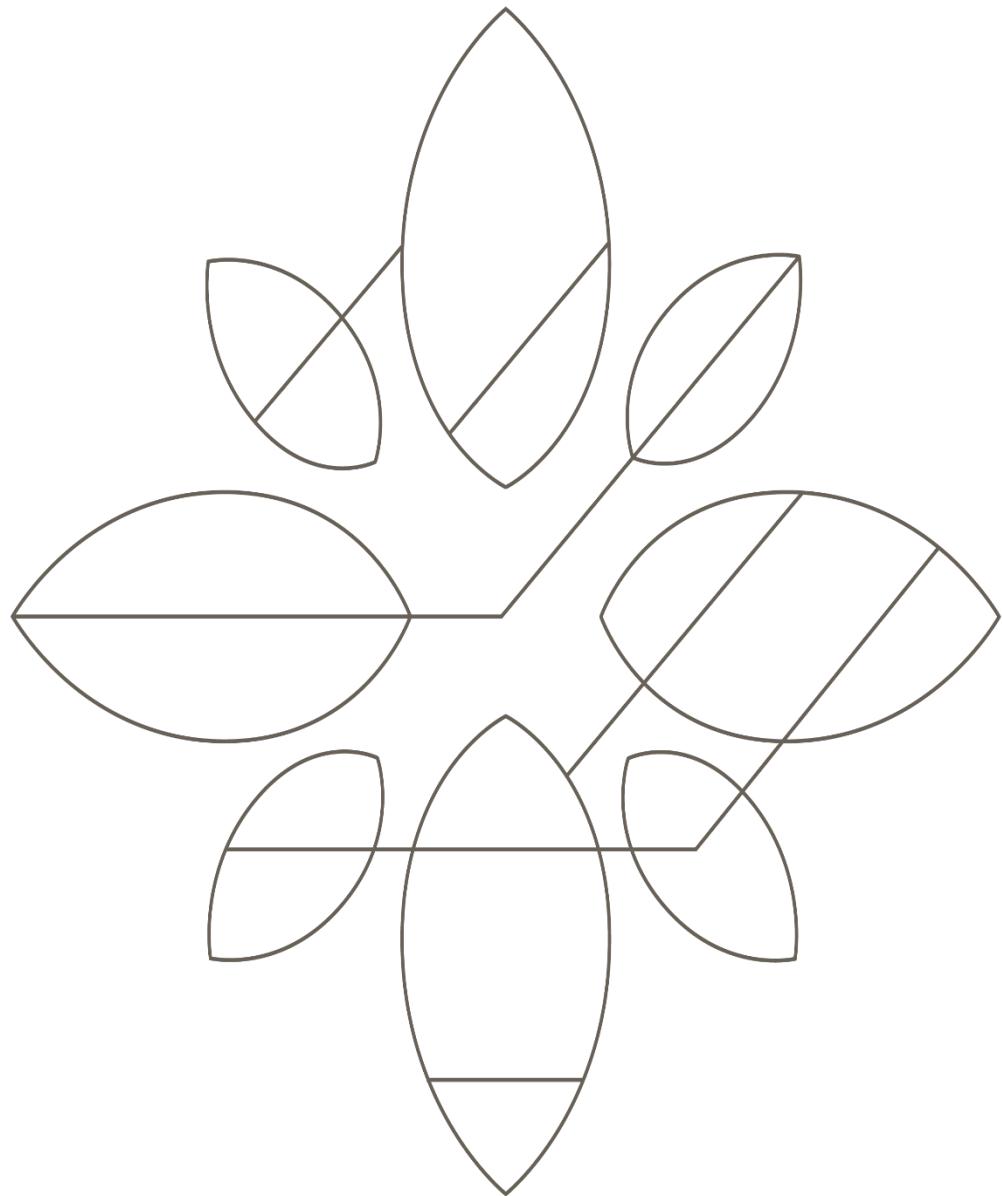
Esta optimización permite analizar las características técnicas y costos de los equipos de cosecha, las diferentes alternativas posibles de caminos según sus restricciones físicas y sus costos de habilitación, así como los costos asociados al transporte interno del predio. Integrando todas estas variables se obtiene una solución óptima minimizando el costo total de producción del predio.

El sistema Planex cuenta con dos módulos: el módulo automático y el módulo planificador. El módulo automático consiste en que el sistema Planex entrega una solución factible al problema de planificación buscando las mejores alternativas para posicionar los equipos de cosecha y la mejor red de caminos para conectar dichos puntos. En este módulo, la solución es principalmente generada por Planex sin mayor intervención del usuario.

Por otra parte, el módulo planificador consiste en que el usuario ingresa datos de localización de equipos de cosecha y una red de caminos, y luego el sistema simplemente calcula el costo de dicha habilitación. Este módulo permite que el usuario entregue una solución parcial o total de la habilitación del predio, en donde Planex completará según corresponda con la solución faltante.







## 4. Diseño drenaje

La conveniencia de drenar el agua fuera de la estructura del pavimento ha sido un factor que siempre se ha considerado en forma preponderante en el diseño de un camino, a pesar de lo cual, normalmente las bases que se construyen no drenan bien. El exceso de agua que se origina, unido a la alta frecuencia y peso de las cargas solicitantes, llevan a menudo a deterioros prematuros de una estructura, por lo que un **buen diseño debe considerar los efectos del contenido de humedad en los suelos de la subrasante, bases y subbases.**

### 4.a. Objetivos del drenaje

El drenaje en un camino busca eliminar el exceso de agua superficial sobre la franja del camino, restituir la red de drenaje natural, la cual se ve afectada por el trazado y evitar que el agua subterránea pueda comprometer la estabilidad de la base y cortes del camino. Para cumplir estos fines se requiere:

- Estimar la magnitud y frecuencia del escurrimiento producido por las tormentas.
- Conocer el drenaje superficial natural del terreno y restituir aquellos drenajes interceptados por el camino.
- Determinar las características del flujo de agua subterránea, y
- Estudiar el efecto que el camino tiene sobre los canales y cursos de agua existentes, cuyo trazado deba ser modificado.

### 4.b. Cómo afecta el agua a un camino

El agua afecta a los caminos ya que tiene gran influencia en las propiedades físicas de los suelos, especialmente en los de textura más fina, en los cuales el espesor de la película de agua adsorbida (agua concebida como una película que envuelve las partículas de suelo sobre la cual actúan las fuerzas moleculares de adhesión) es del orden de magnitud del tamaño de las partículas minerales. Los efectos del agua pueden manifestarse en:

- *Cambio de Volumen:* La película de agua es la causante directa de las expansiones y contracciones que puede experimentar una masa de suelo y que están en relación directa a su volumen. Mientras más fina es la textura del suelo, mayor es el efecto en el cambio de volumen.

- *Cambio de Cohesión:* Un suelo fino en estado natural (sin remoldear) puede tener cohesión debido a la existencia de una estructura continua de sus partículas y que se mantiene aun cuando el suelo alcance un contenido de humedad equivalente a su límite líquido.

**Límite Plástico** es el contenido de humedad sobre el cual las partículas de suelo están bien lubricadas y pueden ser moldeadas en una masa plástica. Una menor cantidad de agua lleva al suelo a un estado semi-sólido, quebradizo, en el cual se evidencian características granulares. Por otra parte, una mayor cantidad de agua hace al suelo más plástico como resultado de una disminución de su cohesión. El límite plástico es el menor contenido de agua para el cual el suelo mantiene características plásticas.

**Límite Líquido** representa el menor contenido de agua necesario para reducir la masa de suelo a una condición de semifluido, con una cohesión insignificante. En este sentido, dicho contenido de humedad puede considerarse como un límite de saturación.

La capacidad de un suelo de absorber agua sin perder su cohesión o pasar al estado semifluido queda expresada por la diferencia de los límites líquidos y plásticos, y recibe el nombre de **Índice de Plasticidad IP**.

El Límite Líquido (LL), Límite Plástico (LP) e Índice de Plasticidad (IP) se determinan con ensayos de laboratorio.

- *Cambio en la Estabilidad Mecánica:* Los suelos que tienen características granulares poseen la importante propiedad de desarrollar estabilidad interna debido al soporte mutuo de sus partículas caracterizada por su fricción interna. Esta propiedad puede verse alterada por la película de agua adsorbida, cuyo efecto depende de la relación entre el espesor de ésta y el tamaño y forma de las partículas de suelo. Mientras en los suelos de textura gruesa prácticamente no tiene influencia, en los de textura fina puede ser un factor determinante.

La experiencia indica que en los suelos formados por partículas cuyo tamaño cae dentro del rango de los limos (entre 0,0039mm y 0,0625mm), la película de agua adsorbida dificulta el contacto entre los granos disminuyendo su estabilidad mecánica.

Desde el punto de vista constructivo los limos son indeseables, especialmente en obras viales. La facilidad con que pierden su estabilidad mecánica en presencia de agua, así como su falta de cohesión, determina que tenga un bajo poder de soporte y sean muy erosionables.

- *Cambio en las Presiones Efectivas:* La presencia de agua libre en los suelos hace necesario un análisis respecto de las presiones.

En la mayoría de los problemas de diseño y constructivos resulta indispensable tener cabal conocimiento de la forma en que las presiones generadas por el agua libre actúan en el suelo.

El agua puede ingresar a un camino por distintas zonas:

1. Precipitaciones y/o grietas (si hay capa asfáltica)
2. Escorrentía superficial
3. Berma granular
4. Infiltración subterránea por taludes
5. Por capilaridad o presión de poro negativa
6. Infiltración en zanjas a la subrasante
7. Infiltración en zanjas a la subbase
8. Infiltración en zanjas a la base

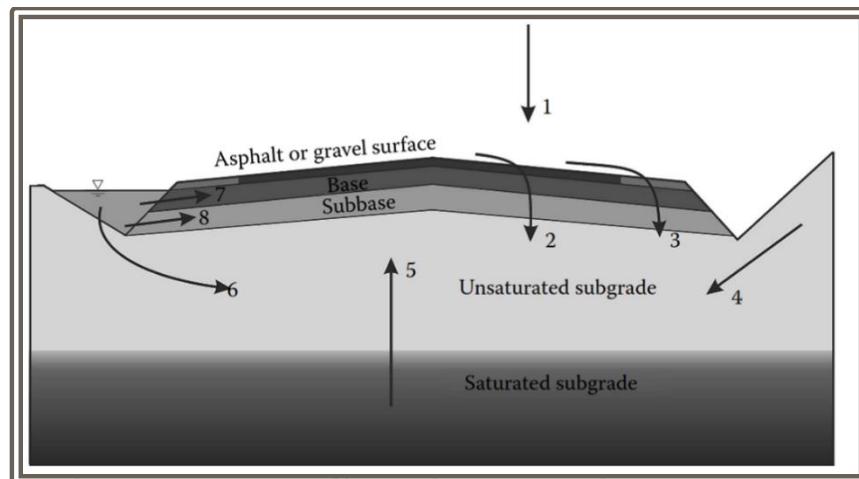


Figura 28: Influencia del agua en un pavimento, corte típico.

Por el tipo de materiales y la forma en que se conforma un camino de explotación forestal, todas las zonas mostradas en el esquema anterior pueden aportar agua a la estructura del camino.

#### 4.c. Drenaje superficial

El drenaje superficial es el conjunto de obras destinadas recolectar las aguas provenientes de precipitaciones o de deshielos, canalizarla y evacuarla a los cauces naturales, a sectores naturalmente bajos o a la capa freática del terreno.

#### 4.d. Drenaje interno

El drenaje interno tiene por objetivo impedir el acceso del agua a capas superiores del camino, por lo que debe controlar el nivel freático del terreno y los posibles acuíferos y corrientes subterráneas existentes.

#### 4.e. Elementos para realizar drenaje

##### i. Pendientes longitudinales y transversales

Las pendientes longitudinales, así como las transversales (bombeo y peralte) permiten que el agua que cae al camino pueda escurrir hacia algún punto de salida y no sea absorbida por la carpeta granular ni subrasante o disminuir el porcentaje de absorción.

Las pendientes longitudinales máximas fueron indicadas en el capítulo 3, punto v. y la restricción viene dada por la capacidad de tracción de los camiones y seguridad de la operación.

La pendiente transversal (bombeo) en recta será a 2 aguas con valor mínimo 3% y máximo 4%. La pendiente transversal en curva (peralte) será hacia el interior de la curva con valor mínimo 4% y máximo 7% (Ver Figura 29).

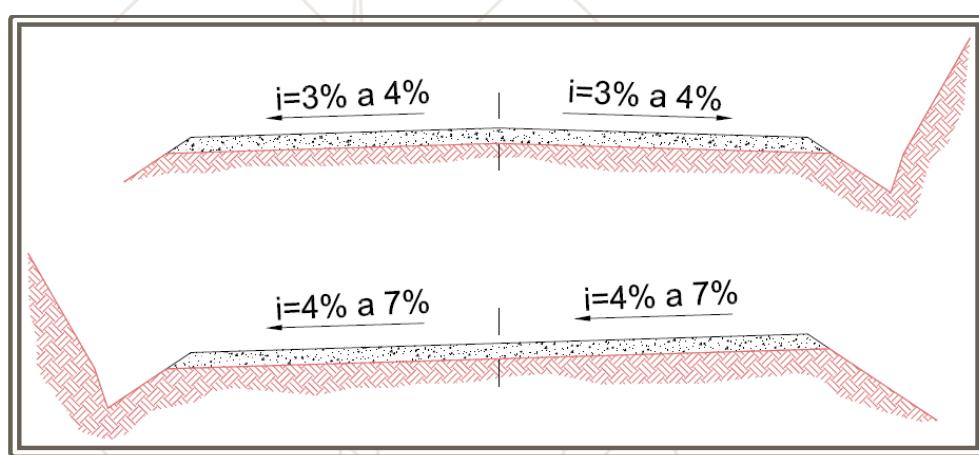


Figura 29: Bombeos y peraltes típicos para camino forestal.

## ii. Alcantarillas

Se entiende por alcantarilla una estructura de drenaje, cuya luz mayor, medida paralela al eje de la carretera, sea de hasta 6 m.

La función de las alcantarillas es proporcionar un medio para que el agua superficial, que escurre por cauces naturales o artificiales de moderada importancia, en forma permanente o eventual, pueda atravesar bajo la plataforma del camino, sin causar daños a ésta ni riesgos al tránsito.

Su ubicación en planta, así como su dimensionamiento, se realizará con la aplicación SIGAA, (ver sub capítulo f).

Como restricciones generales se tiene:

- Por condiciones de mantenimiento, el diámetro mínimo a utilizar será de 300 mm.
- La forma de las alcantarillas será circular y el material será HDPE (High Density Polyethylene / polietileno de alta densidad).

### iii. Cunetas, fosos y antefosos decantadores

#### *Cunetas:*

Cuneta se denomina a la zanja que se crea a los costados de un camino con el objetivo de conducir el agua proveniente de la carpeta y del talud hacia una alcantarilla, una bajada de agua o hacia una salida de agua.

Las cunetas tendrán las siguientes dimensiones:

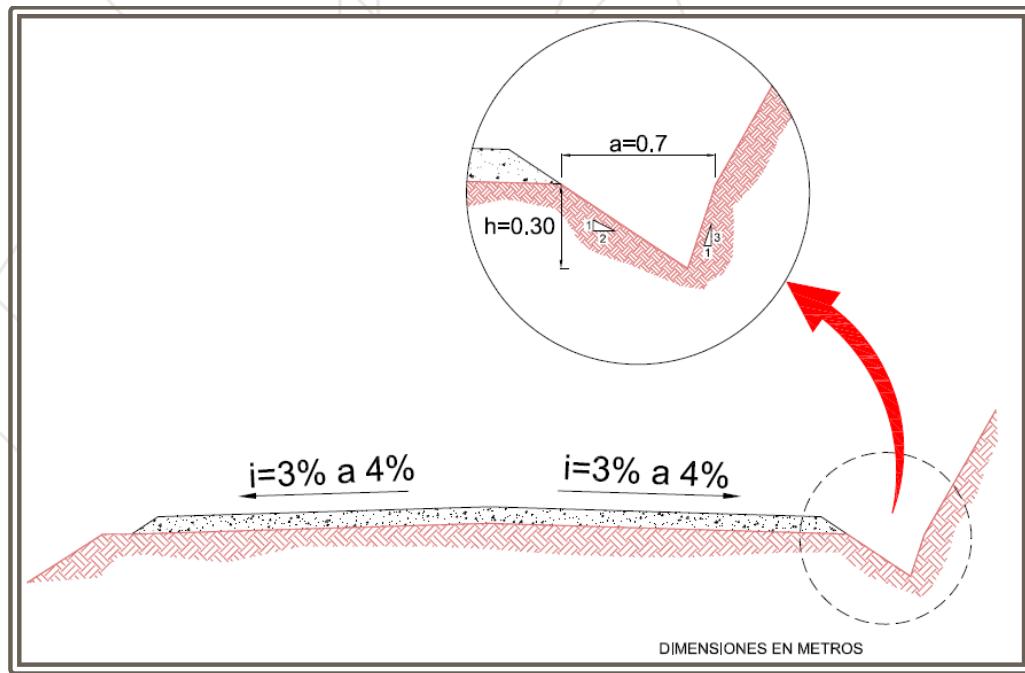


Figura 30: Dimensiones de cunetas

Con estas dimensiones, utilizando la expresión de Manning para canales abiertos, es posible evacuar los caudales indicados en la Tabla 6, con las velocidades correspondientes.

Expresión de Manning:

$$Q = \frac{R^{2/3} \times i^{1/2} \times A}{n}$$

Donde:

- Q : Caudal (m<sup>3</sup>/s)  
R : Radio hidráulico (m)  
i : Pendiente (m/m)  
A : Área de la sección transversal (m<sup>2</sup>)  
n : coeficiente de rugosidad de Manning.

Para terreno natural en tierra se puede considerar un valor de n=0,027 (Chow, V. T. ; Maidment, D. R.; Mays, L. W. (1988), Applied Hydrology).

Haciendo los cálculos se tiene que:

Tabla 6: Caudales y velocidades máximas para distintas pendientes longitudinales

i (%)	Q (m <sup>3</sup> /s)	V (m/s)	Observación
2	0,25	1,18	
4	0,35	1,66	
6	0,43	2,04	Usar disipadores de energía
8	0,49	2,35	Usar disipadores de energía
10	0,55	2,63	Usar disipadores de energía
12	0,60	2,88	Usar disipadores de energía
14	0,65	3,11	Usar disipadores de energía

Las velocidades máximas admisibles (m/s) en canales no revestidos, son las indicadas en la Tabla 7:

Tabla 7: Velocidades máximas admisibles en canales no revestidos.

(Fuente: V-3 Manual de Carreteras del MOP)

Tipo de Terreno	Flujo Intermitente (m/s)	Flujo Permanente (m/s)
Arena Fina (no coloidal)	0,75	0,75
Arcilla arenosa (no coloidal)	0,75	0,75
Arcilla limosa (no coloidal)	0,90	0,90
Arcilla fina	1,00	1,00
Ceniza volcánica	1,20	1,00
Grava fina	1,50	1,20
Arcilla dura (coloidal)	1,80	1,40
<b>Material graduado (no coloidal):</b>		
desde arcilla a grava	2,00	1,500
desde limo a grava	2,10	1,70
Grava	2,30	1,80
grava gruesa	2,40	2,00
desde grava a piedras (bajo 15 cm)	2,70	2,10
desde grava a piedras (sobre 20 cm)	3,00	2,40

### *Fosos y antefosos decantadores:*

El objetivo de los fosos y antefosos decantadores es servir como cámara decantadora para que el agua que ingresa a las alcantarillas esté lo más limpia posible considerando las características de la operación forestal, además, deben ser capaces de contener el suelo transportado por erosión producto de los movimientos de tierra y construcción de caminos.

La dimensión de los fosos será de 1,0 metro (en el sentido de longitudinal del camino) por 0,7 metros (en el sentido transversal) y la profundidad será tal que se tengan bajo la cota de entrada del tubo 0,5 metros disponibles.

La dimensión de los antefosos será de 1,0 metro (en el sentido de longitudinal del camino) por 0,7 metros (en el sentido transversal) y 0,6 metros de profundidad y se construirán 2,0 metros antes del foso. (Ver Figura 31, Figura 32, Figura 33 y Figura 34).

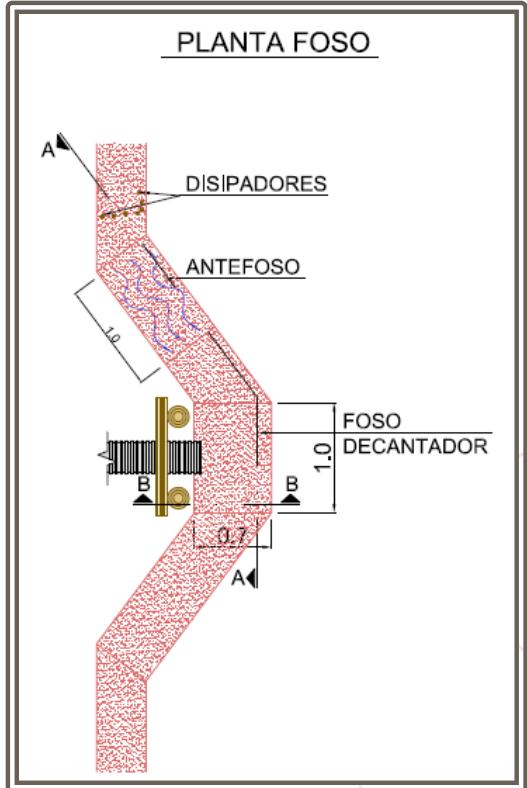


Figura 31: Planta fosos y antefosos

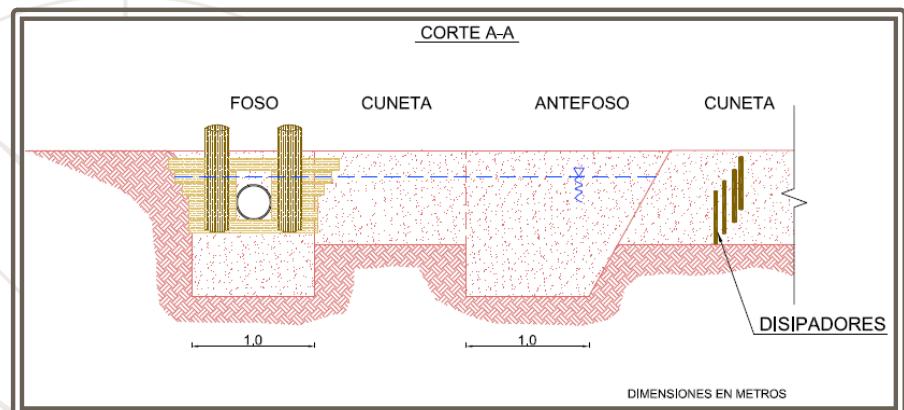


Figura 32: Corte longitudinal típico foso y antefoso

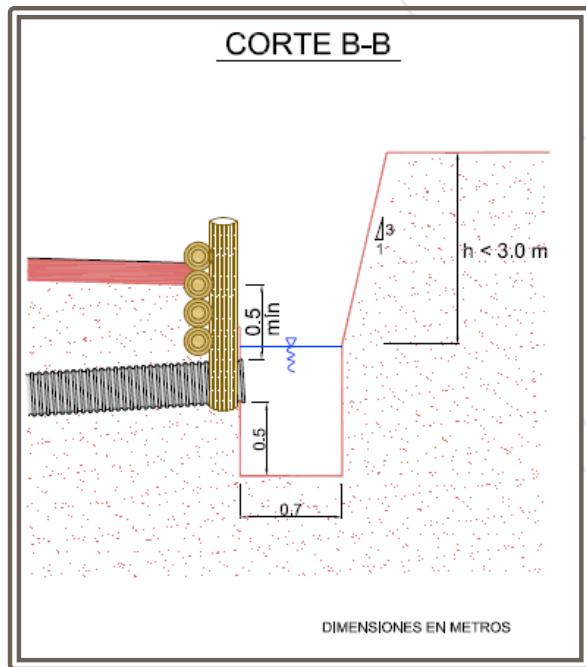


Figura 33: Corte tipo para taludes con alturas inferiores a 3,0 m.

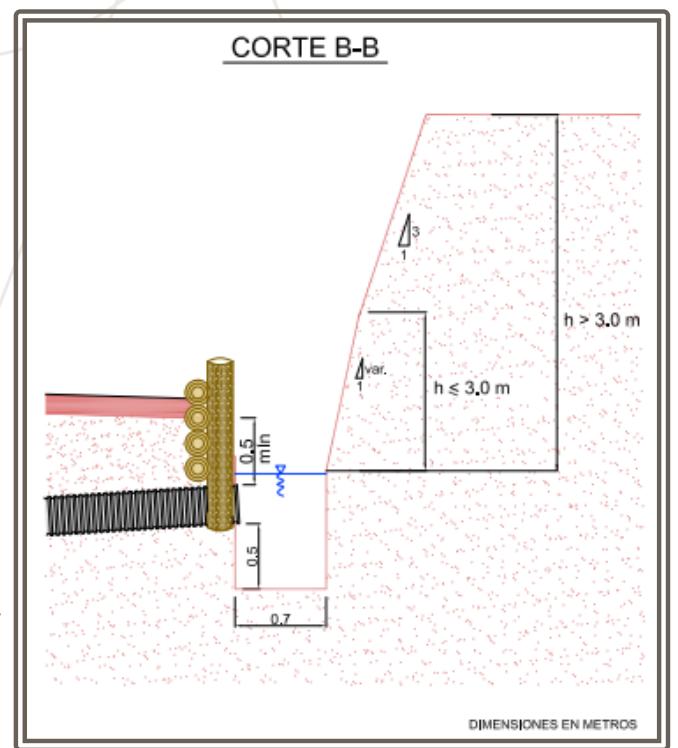


Figura 34: Corte tipo para taludes con alturas superiores a 3,0 m.

#### iv. Disipadores de energía

Los disipadores de energía son estructuras que se diseñan para generar pérdidas hidráulicas importantes en los flujos de alta velocidad. El objetivo es reducir la velocidad.

La disipación de la energía cinética puede lograrse aplicando diferentes medidas, a saber: generación de resalto hidráulico, impacto o incremento de la rugosidad.

En el caso de las cunetas, en términos generales no se deberían alcanzar velocidades superiores a las indicadas en la Tabla 7: Velocidades máximas admisibles en canales no revestidos. (Fuente: V-3 Manual de Carreteras del MOP) para flujos intermitentes, por lo que si contrastamos las velocidades teóricas calculadas en la Tabla 6 con las máximas permitidas, se hace necesario colocar disipadores de energía (Ver Imagen 2) cuando la pendiente longitudinal sea mayor a 4%.

Por tanto, se instalará disipadores de energía en los siguientes casos:

- Como parte de todas las alcantarillas, un disipador a la entrada del antefoso.
- Adicionalmente, para pendientes entre 4% y 8%, instalar, un disipador de energía 5,0 metros antes del antefoso.
- Si la pendiente es superior a 8%, instalar adicionalmente disipadores cada 50 metros aguas arriba, hasta el inicio del tramo que recolecta agua en la cuneta.

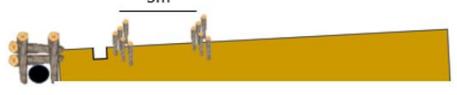
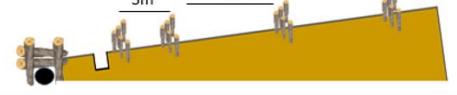
PENDIENTE	UBICACION
<4%	
4% - 8%	
> 8%	

Figura 35: Disposición de disipadores de energía



Imagen 2: Disipadores de energía

v. **Bajadas de agua**

La finalidad de las bajadas de agua es proteger contra la erosión los taludes de terraplenes y cortes, evacuando las aguas recogidas por canales laterales o interceptores o alcantarillas a cauces o lugares bajos cercanos.

El espaciamiento y ubicación de las bajadas de agua dependen de la conformación del terreno y del perfil del camino.



Imagen 3: Bajadas de agua

#### vi. Subdrenes

Los subdrenes consisten en zanjas de sección rectangular, llenas con material granular permeable, rodeado de un filtro de tela geotextil, que pueden llevar una tubería en el fondo si el caudal a evacuar así lo amerita (Ver Figura 36).

Los subdrenes se podrán utilizar principalmente en los siguientes casos:

- Longitudinalmente, al pie de los taludes de corte que vierten agua hacia el camino, para interceptar filtraciones.
- Longitudinalmente bajo la subbase del camino para sanear el área.

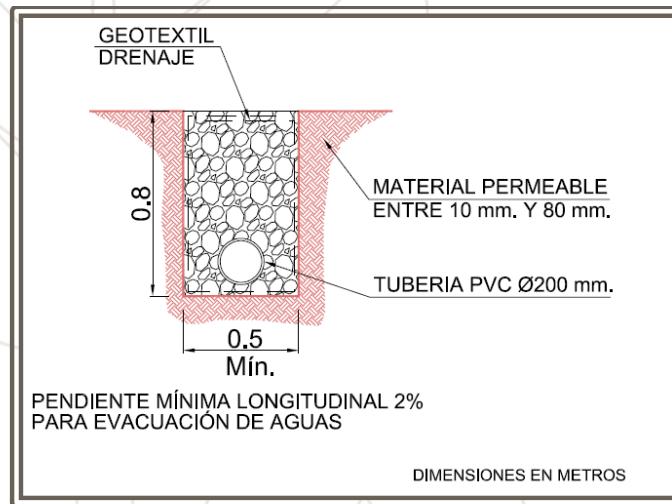


Figura 36: Subdren

#### vii. Puentes

Los puentes son obras de arte mayores, tanto por su tamaño como por la complejidad de su diseño y construcción.

Estas obras, por su condición de complejidad, serán tratadas en un documento aparte.

#### 4.f. Ubicación y dimensionamiento de alcantarillas

La ubicación en planta de las alcantarillas, así como el cálculo del caudal para su dimensionamiento, será realizada por medio de la aplicación SIGGA desarrollada por Bioforest.

La aplicación SIGAA utiliza como base de sus cálculos el modelo digital del terreno (DEM), proveniente de datos Lidar (por su sigla en inglés Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging) a una resolución de un metro y un archivo de datos (shape) con la información principal de los caminos. La aplicación SIGAA efectúa, con el archivo de datos de los caminos (shape) una actualización automática de la información de los caminos construidos posteriormente a la toma de datos que originó el DEM.

La información sobre coeficiente de escorrentía e intensidad de lluvia debe ser ingresada por el usuario según datos disponibles y actualizados al momento de diseñar.

La aplicación identifica los cruces de quebradas con la red de caminos, calcula el área que tributaría a las zonas de cruce, estima el caudal aportante bajo esas condiciones y realiza un dimensionamiento de las alcantarillas. Adicionalmente, identifica aquellos sectores donde, a través de los caminos, se producen flujos de agua sobre la carpeta de rodado que sobrepasan un cierto valor (definido en los parámetros de entrada) que no pueden ser evacuados en forma segura y sugiere la ubicación y dimensionamiento de nuevas alcantarillas.

#### 4.g. Obras Complementarias

Las obras complementarias, son aquellas que se utilizan de manera menos frecuente en la construcción de caminos para asegurar un buen saneamiento y comportamiento tanto de la infraestructura como de la superestructura. Podemos mencionar algunas de ellas:

- Empalizadas, estructuras que se utilizan para contención de material:

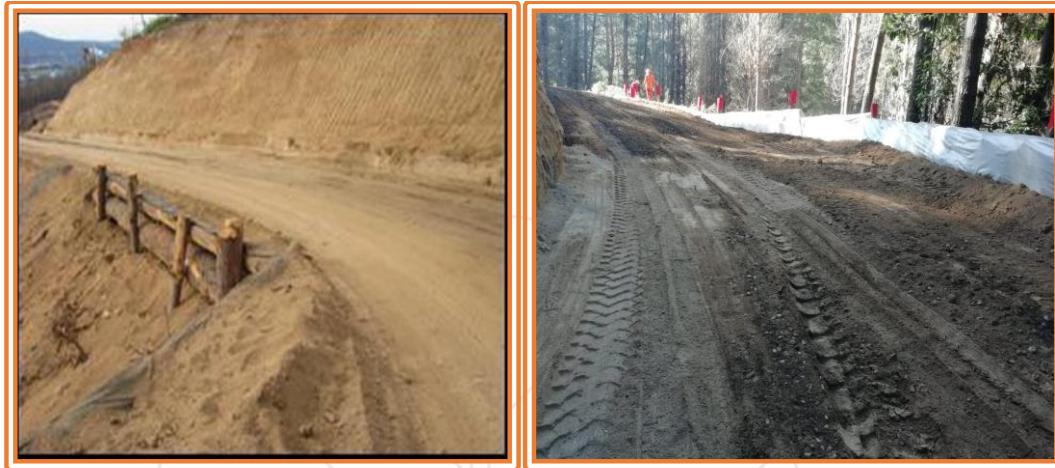


Figura 37: Empalizada

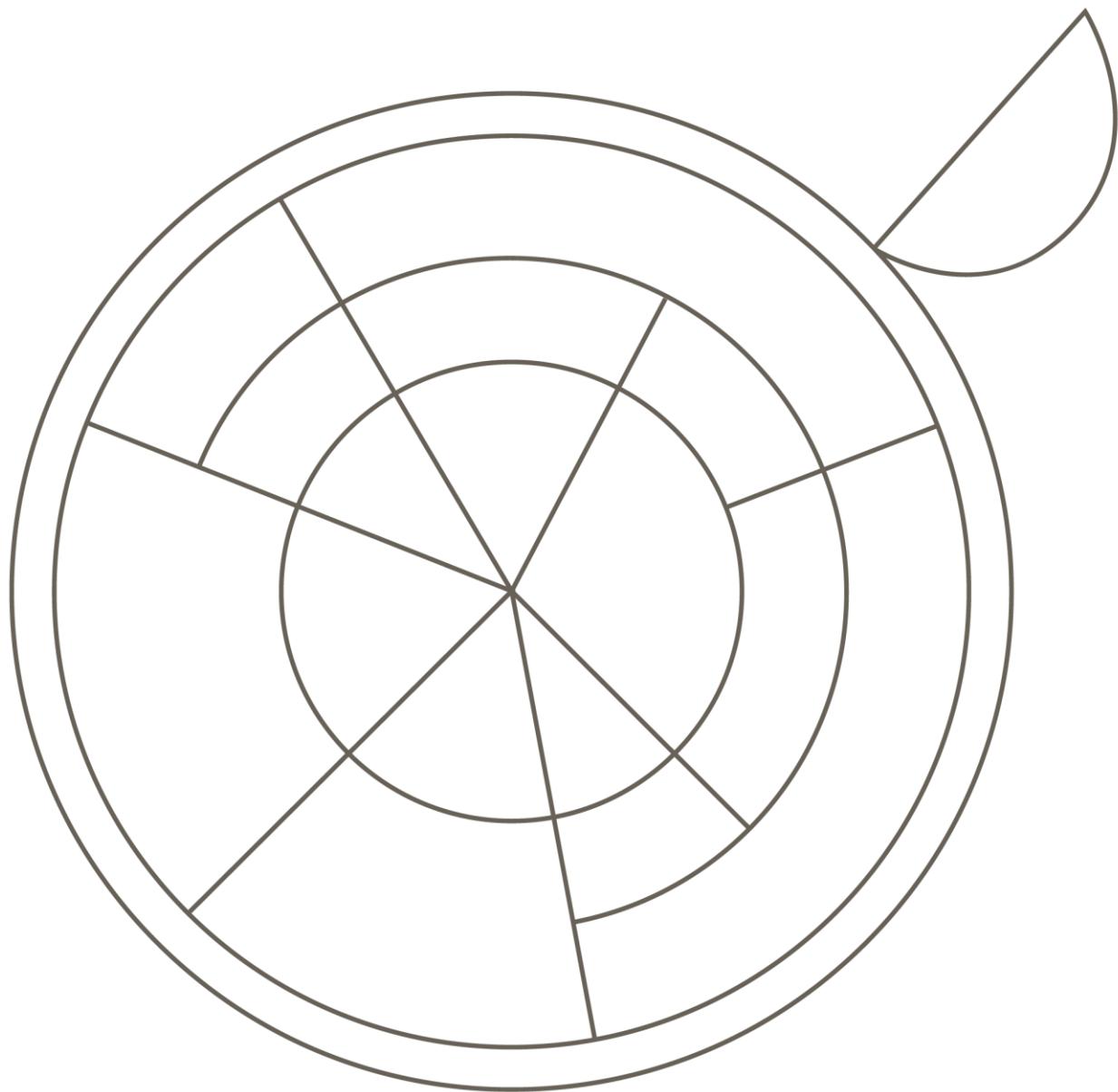
- Protección de talud, por medio de contenciones/defensa o siembra:



Figura 38: Contención o defensa

- Piscinas decantadoras de agua, para evacuar agua en predios planos.





## 5. Diseño estructural

### 5.a. Objetivos del diseño estructural

El objetivo del diseño estructural es determinar la mejor combinación de materiales y sus respectivos espesores, de modo que la solución entregada sea técnicamente adecuada optimizando la utilización de los materiales disponibles.

Del párrafo anterior se desprende que **el diseño estructural para un camino no es una solución única**, hay varias opciones que pueden técnicamente satisfacer los requerimientos de estructura, por lo que la solución más económica para el caso particular en estudio será la que se deba adoptar.

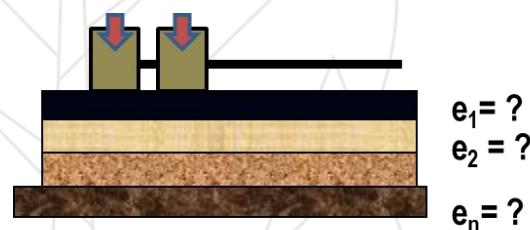


Figura 39: Corte tipo de una estructura genérica de pavimento

### 5.b. Tipos de caminos

Hay 2 tipos básicos de caminos:

1. Pavimentados.
2. No pavimentados.

Estos, a su vez, se clasifican de la siguiente forma:

- Pavimentados:
  - Asfalto
  - Hormigón

- No pavimentados:
  - Viales
  - De explotación:
    - Forestales
    - Mineros
    - Otros

Por tanto, este Manual está orientado a **caminos del tipo no pavimentados y de explotación forestal**.

### 5.c. Metodología de diseño

Existen una serie de métodos para realizar el diseño estructural de una estructura de pavimentos, los que se pueden agrupar en 3 categorías:

- Empíricos
- Mecanicistas
- Mecanicistas-empíricos

Los métodos empíricos, correlacionan el comportamiento de un tipo de pavimento in situ, a través de observaciones y mediciones en terreno, con los factores que producen daños en la estructura, tales como tránsito, clima, calidad de materiales, etc.

Las correlaciones obtenidas son válidas en el lugar donde se realizó la observación y mediciones, para otras condiciones, sean de tránsito, suelo de fundación, climáticas o de calidad de materiales se deben realizar modificaciones de acuerdo con la experiencia o bien, a algunas expresiones teóricas.

Los métodos mecanicistas permiten calcular muy exactamente las tensiones, deformaciones y deflexiones que originan las cargas solicitantes en cualquier punto de la estructura. Sin embargo, se genera una nueva dificultad debido a que el comportamiento del pavimento depende también de una serie de otros factores, muchos de los cuales no pueden ser modelados con exactitud. Esta dificultad se soluciona recurriendo a correlaciones empíricas, denominadas modelos de fatiga, con los que se pueden definir el número de ciclos de carga que acepta el camino, por ello el nombre de mecanicistas – empíricos.

El diseño estructural para caminos forestales se realizará con el método mecanicista-empírico para condiciones de fundación, tránsito y ambientales específicas.

#### 5.d. Materiales y tecnologías a utilizar en el diseño estructural

Las **bases granulares** para construcción de carpetas granulares deberán ajustarse a una de las siguientes bandas granulométricas y requisitos de calidad indicados en las Tabla, 8 y Tabla 9 respectivamente:

Tabla 8: Banda granulométrica material de Base Granular

Tamiz (ASTM)	TM 2 ½ “ % en peso que pasa	TM 1 ½ “ % en peso que pasa
2 1/2"	100	
2"	95 - 100	
1 1/2"	70 - 95	100
1"	55 - 85	80 - 100
3/4"	45 - 75	60 - 90
3/8"	35 - 65	50 - 80
Nº 4	20 - 40	35 - 65
Nº 10	15 - 35	25 - 45
Nº 40	5 - 20	5 - 30
Nº 200	0 - 8	0 - 8

Tabla 9: Requisitos de calidad para material de Base Granular

Ensaye	Exigencia	Método
Granulometría	Según Banda	8.102.1 del MC-V8
Chancado	Mín 70% *	8.202.6 del MC-V8
Desgaste Los Ángeles	Máx 35%	8.202.11 del MC-V8
Límite Líquido	Máx 30%	8.102.3 del MC-V8
Índice de Plasticidad	Mín 3% y Máx 8%	8.102.4 del MC-V8
Capacidad de soporte CBR	Mín 80% (al 95% de la DMCS)	8.102.11 del MC-V8

\* Para el caso de pozos lastreros, se aceptará un Chancado mínimo de 60%.

Las **subbases granulares** que podrán utilizarse en la construcción de caminos forestales deberán ajustarse a la banda granulométrica y los requisitos de calidad indicados en Tabla 10 y Tabla 11, respectivamente:

Tabla 10: Banda Granulométrica material de Subbase Granular

Tamiz (ASTM)	% en peso que pasa
4"	100
1"	20 - 80
Nº 4	15 - 30
Nº 200	0 - 8

Tabla 11: Requisitos de calidad Subbase Granulares

Ensaye	Exigencia	Método
Granulometría	Según Banda	8.102.1 del MC-V8
Chancado	Sin exigencia	
Desgaste Los Ángeles	Máx 40%	8.202.11 del MC-V8
Límite Líquido	Máx 35%	8.102.3 del MC-V8
Índice de Plasticidad	Max 6%	8.102.4 del MC-V8
Capacidad de soporte CBR	Mín 50% (al 95% de la DMCS)	8.102.11 del MC-V8

### 5.e. Espesores de diseño

El diseño estructural se presentará por medio de cartillas, las cuales agrupan soluciones con diferentes alternativas de materiales. Los parámetros de entrada de las cartillas son el CBR, el volumen de madera que será transportado por dicho camino, y el clima específico de la zona del camino (Figura 40). Dichos parámetros fueron agrupados en rangos para simplificar el proceso de diseño. Los rangos de parámetros de entrada fueron amplios con el objeto de cubrir la mayor cantidad de situaciones que se presentan en las distintas zonas geográficas de Forestal Arauco.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
S1									
S2									
S3									
S4									
S5									
S6									
S7									
S8									
S9									
S10									

Figura 40: Cartilla de diseño: para la cartilla asociada a un tipo de clima, se ingresa por el tipo de suelo (S) y el volumen de madera (T) y se obtiene la solución.

Los diseños consideran soluciones con materiales tradicionales, cuyas propiedades mecánicas y de desempeño son conocidas, y soluciones con materiales que no son tan utilizados en construcción de caminos, pero en ciertos escenarios son una alternativa a incorporar en el diseño.

#### 5.e.i. Selección de Variables y Parámetros

La unidad utilizada en diseño de caminos para estimar el efecto del tránsito son los ejes equivalentes. Un eje equivalente corresponde al daño que realiza en un camino un eje de peso y configuración conocidos. Por ejemplo, un eje simple con rueda doble de 8.16 toneladas de peso representa un eje equivalente.

Para la estimación del tránsito de diseño se realizó un análisis de los camiones utilizados en Forestal Arauco. Se estimó el daño que hacen sobre los caminos utilizando su configuración típica (Figura 41) y la cantidad de carga transportada. Posteriormente, se relacionó el volumen de madera a transportar en metros cúbicos con los ejes equivalentes aplicados.

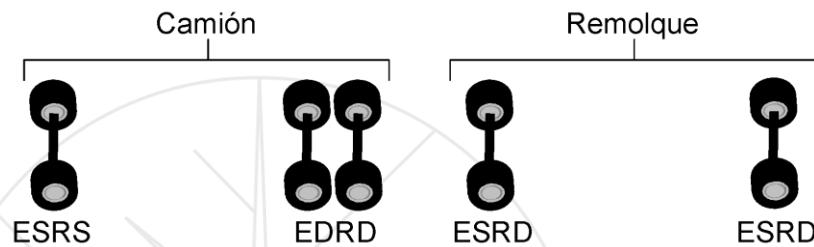


Figura 41: Combinación de ejes de camión y remolque (ESRS = Eje Simple Rueda Simple, EDRD = Eje Doble Rueda Doble, ESRD = Eje Simple Rueda Doble)

El análisis permitió establecer rangos representativos de tránsito que son incorporados como un parámetro de entrada en las cartillas de diseño. Los nueve rangos de tránsito van desde 0 hasta 600,000 m<sup>3</sup> de madera. Por ejemplo, si la cantidad de madera que se transporta en un camino es de 34,000 m<sup>3</sup>, ese camino tiene un rango de tránsito T5.

Tabla 12: Rangos de metros cúbicos de madera en cartillas

ID	Cosecha de madera (m <sup>3</sup> )
T1	Menor a 2500
T2	Entre 2,500 y 5,000
T3	Entre 5,000 y 15,000
T4	Entre 15,000 y 30,000
T5	Entre 30,000 y 50,000
T6	Entre 50,000 y 100,000
T7	Entre 100,000 y 300,000
T8	Entre 300,000 y 600,000
T9	Mayor a 600,000

### 5.e.ii. Capacidad de Soporte de la Subrasante o Plataforma

Los ensayos básicos para estimar la capacidad de soporte de la subrasante o plataforma son:

- Distribución de tamaños de partículas o granulometría
- Densidad máxima compactada seca y humedad óptima (Proctor Modificado)
- Límites de Atterberg
- Razón de Soporte California (CBR)

El parámetro fundamental y más comúnmente evaluado para estimar la resistencia y capacidad estructural de un suelo es el CBR. Este ensayo representa la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones particulares de carga. El valor obtenido en el ensayo CBR representa la resistencia relativa de un suelo patrón. El CBR se puede realizar a distintas densidades, representativas de terreno y por ende es fundamental además realizar el ensayo Proctor Modificado. La distribución de tamaños de partículas o granulometría es útil para determinar la naturaleza del suelo y los límites de Atterberg para ver el comportamiento del suelo frente al agua.

Existen ensayos complementarios a los anteriormente descritos que permiten conocer mejor el comportamiento in-situ de la subrasante o plataforma de manera sencilla, disminuyendo la incertidumbre del comportamiento del suelo:

- Penetrómetro Dinámico de Cono Portátil (PDCP)
- Deflectometría de Impacto Liviana (LWD)

También existen correlaciones que permiten verificar los valores de CBR obtenidos en laboratorio según la clasificación AASHTO y USCS del suelo (Figura 42). Sin embargo, siempre es recomendable realizar el ensayo de CBR para medir la resistencia al corte, y en el caso de suelos problemáticos (arcillas y limos con baja capacidad de soporte) y, de ser posible, complementar el análisis con el PDCP y/o LWD.

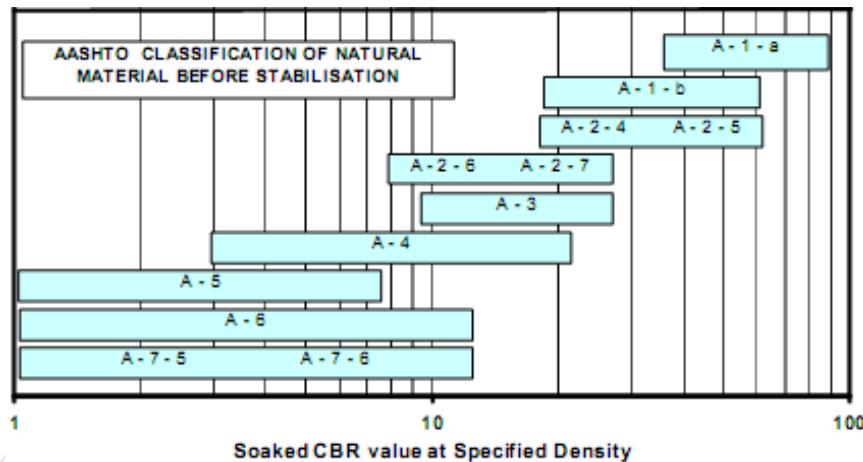


Figura 42: Rangos de CBR para clasificaciones de suelo USCS y AASHTO

En las cartillas de diseño elaboradas en este proyecto el valor de diseño de CBR es una combinación del CBR al 95% de la DMCS y del CBR a densidad natural del suelo encontrado en terreno. Esto se debe a que durante la construcción de los caminos los primeros 20 cm de la subrasante o plataforma son compactados al 95% de la DMCS y el resto del suelo queda, aproximadamente, con la densidad natural previo a la compactación. Por lo tanto, el CBR de diseño es una combinación de las resistencias a distintas densidades. El método de cálculo del CBR Combinado se explicará más adelante.

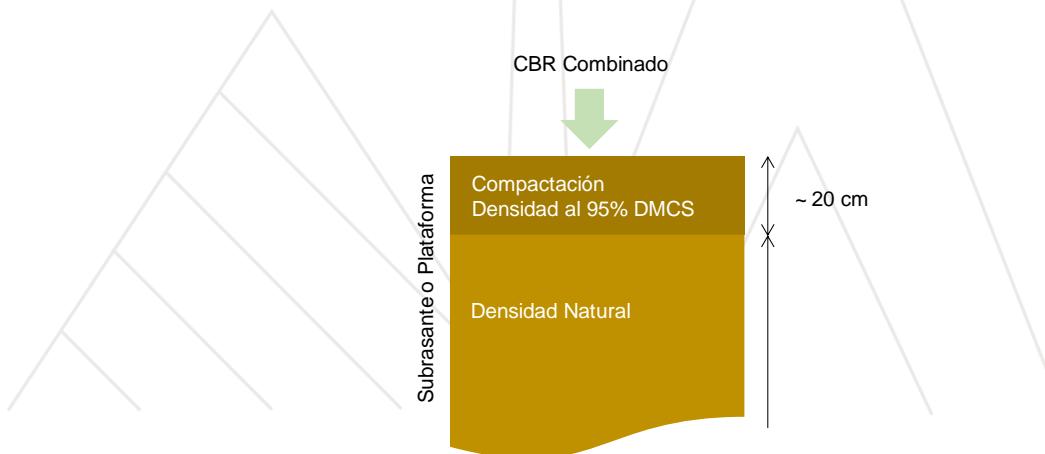


Figura 43: Concepto de CBR combinado utilizado en cartillas de diseño

El análisis de los CBR de suelos representativos en caminos de Forestal Arauco permitió realizar una clasificación en siete rangos de diseño (Tabla 13).

Tabla 13: Rangos de CBR en cartillas

ID	CBR
S1	Menor a 2%
S2	Entre 2% y 3%
S3	Entre 3% y 4%
S4	Entre 4% y 6%
S5	Entre 6% y 7%
S6	Entre 7% y 10%
S7	Entre 10% y 13%
S8	Entre 13% y 15%
S9	Entre 15% y 20%
S10	Mayor a 20%

#### 5.e.iii. Tipo de estructuras

La guía de diseño estructural propone cinco tipos de estructuras con el fin de entregar una mayor flexibilidad al diseñador de caminos (Figura 44). Estas son:

- Monocapa (base granular CBR > 80%).
- Bicapa (base granular CBR > 80%, subbase granular CBR > 40%).
- Monocapa + Mejoramiento (capa base granular CBR > 80%, mejoramiento con capa granular de material marginal tamaño máximo 5 pulgadas).
- Monocapa + Geosintético (base granular CBR > 80%, geosintético de refuerzo para la subrasante o plataforma).
- Monocapa + Estabilización Subrasante (base granular CBR > 80%, estabilización de la subrasante para aumentar su capacidad de soporte).

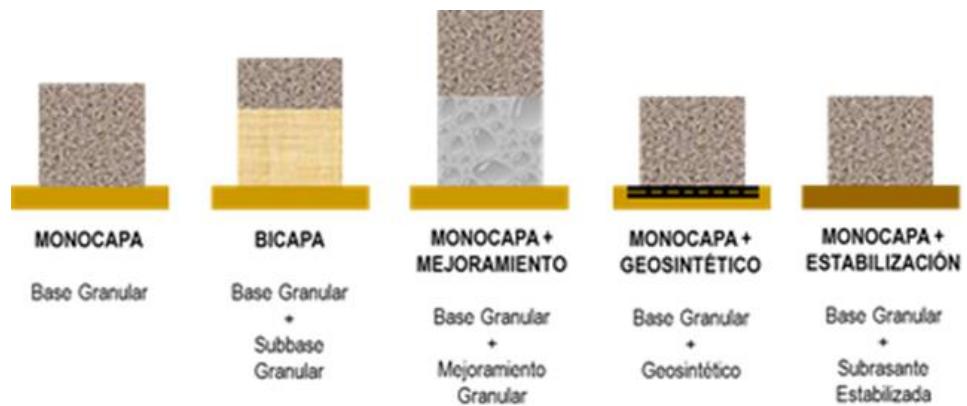


Figura 44: Tipos de estructuras utilizados en cartillas

#### 5.e.iv. Instructivo de Uso de las Cartillas

Los cinco tipos de cartillas de diseño se presentan en la Figura 45. Para cada solución existe una cartilla para clima Normal y otra para clima Lluvioso. El proceso de diseño consiste en tres pasos, descritos a continuación y en la Figura 46.

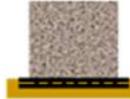
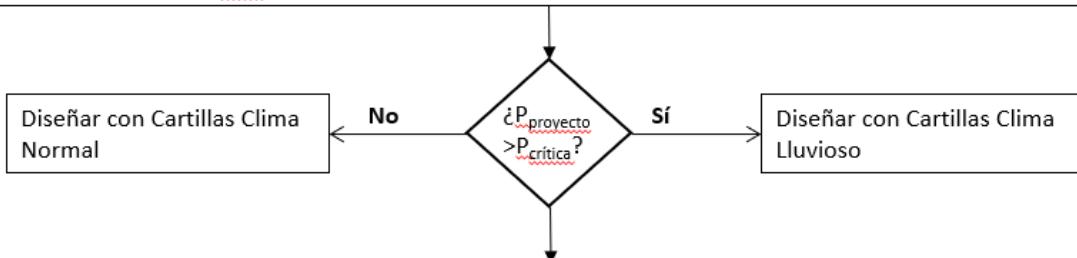
Solución	Clima		Solución	Clima	
	Normal	Lluvioso		Normal	Lluvioso
 <b>MONOCAPA</b> Base Granular	Cartilla N° 1	Cartilla N° 2	 <b>MONOCAPA + GEOSINTÉTICO</b> Base Granular + Geosintético	Cartilla N° 7	Cartilla N° 8
 <b>BICAPA</b> Base Granular + Subbase Granular	Cartilla N° 3	Cartilla N° 4	 <b>MONOCAPA + ESTABILIZACIÓN</b> Base Granular + Subrasante Estabilizada	Cartilla N° 9	Cartilla N° 10
 <b>MONOCAPA + MEJORAMIENTO</b> Base Granular + Mejoramiento Granular	Cartilla N° 5	Cartilla N° 6			

Figura 45: Resumen de cartillas de diseño

## Resumen de Uso de Cartillas

### PASO 1: Clima

- 1.1 Obtener dato de precipitación anual promedio en la zona del proyecto ( $P_{proyecto}$ ).
- 1.2 Obtener el tipo de suelo representativo, la pendiente longitudinal típica y región de ubicación del proyecto.
- 1.3 Obtener la precipitación crítica ( $P_{critica}$ ) de tabla.



### PASO 2: Definir Categoría de Suelo

- 2.1 Determinar CBR a densidad natural y a 95% DMCS cada 500 metros.
- 2.2 Tramificar y definir el valor de CBR combinado para cada tramo (utilizar percentil 70%).
- 2.3 Para cada tramo elegir el CBR combinado de diseño y definir el rango de suelo (S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10).

### PASO 3: Definir Categoría de Tránsito

- 3.1 Determinar el volumen de madera que transitará por el camino.
- 3.2 Elegir rango de tránsito (T1, T2, T3, T4, ST5, T6, T7, T8, T9).

### PASO 4: Elección final de solución

- 4.1 Seleccionar las soluciones disponibles de las 5 cartillas de clima normal o clima lluvioso (según Paso 1).
- 4.2 Si dentro de las soluciones factibles elegidas en paso 4.1 existen soluciones de la cartilla 7 a la 10, repetir 2.2 y 2.3 con el CBR a **densidad natural** (en vez del combinado) y volver a seleccionar las soluciones para las cartillas 7 a la 10.
- 4.4 Calcular el costo de construcción para cada solución.
- 4.5 Ordenar soluciones de menor a mayor costo. La solución de menor costo es la que se debería adoptar en el diseño.

Figura 46: Resumen del Uso de Cartillas

### Paso 1 - Definir Clima: Normal o Lluvioso

El primer paso es definir si se utilizará la cartilla de Clima Normal (cartillas con número impar) o Clima Lluvioso (cartillas con número par). Para definir esto se debe tener la siguiente información:

- Tipo de suelo de plataforma (arcillas, limos, arenas gravas)
- Pendiente longitudinal típica del camino (mayor o menor al 5%)
- Región de ubicación del camino (Maule, Bío-Bío, Araucanía, Los Lagos, Los Ríos)
- Precipitación anual en la zona del proyecto

Con la información se ingresa a la Tabla 14, la cual muestra las precipitaciones críticas para cada condición. Si la precipitación en la zona del proyecto es mayor a la precipitación crítica presentada en la Tabla 15, entonces se deben utilizar las cartillas de Clima Lluvioso. De lo contrario, se debe utilizar las cartillas de Clima Normal.

Tabla 14: Tabla precipitaciones críticas (en milímetros)

Tipo de suelo de Plataforma	Pendiente Longitudinal del Camino	Precipitación Región del Maule, Bío-Bío y Araucanía (mm)	Precipitación Región de Los Lagos, Región de Los Ríos (mm)
Arcillas y Limos A4, A5, A6, A7	> 5%	1800	1500
	< 5%	1200	1000
Arenas y gravas A1, A2, A3, A4	> 5%	3000	2500
	< 5%	1800	1500

**Ejemplo 1:** Si en un proyecto ubicado en la región de Los Lagos tiene suelos arcillosos, la pendiente longitudinal promedio es de 3%, y la precipitación anual es de 1526 mm, se deben utilizar cartillas con Clima Lluvioso (1526 mm > 1000 mm).

**Ejemplo 2:** Si en un proyecto ubicado en la región del Maule tiene suelos arenosos, la pendiente longitudinal promedio es de 6%, y la precipitación anual es de 757 mm, se deben utilizar cartillas con Clima Normal (757 mm < 3000 mm).

## Paso 2 - Definir Categoría del Suelo

Utilizando los métodos descritos anteriormente en este documento, se debe determinar:

- CBR a densidad natural del suelo
- CBR al 95% de la densidad máxima compactada seca del suelo

Para obtener el valor de CBR Combinado se utiliza la Tabla 15.

Tabla 15: Cálculo del CBR Combinado de diseño para ingresar a las cartillas

		CBR a la densidad máxima compactada seca (%)																																						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	25	30	35	40	50														
CBR a la densidad natural (%)	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	5	5	5	6															
	2		2	2	3	3	3	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	6	6	6	6	7	7	8	9													
3			3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6	6	6	7	7	7	7	7	8	9	9	10	11															
4				4	4	5	5	6	6	6	6	7	7	7	7	8	8	8	8	8	9	10	11	12	13															
5					5	5	6	6	7	7	7	8	8	8	9	9	9	9	9	10	11	12	12	13	15															
6						6	6	7	7	8	8	8	9	9	9	10	10	10	10	10	11	12	13	14	15	16														
7							7	7	8	8	9	9	9	10	10	10	10	11	11	11	11	13	14	15	16	18														
8								8	8	9	9	10	10	10	11	11	11	11	12	12	12	14	15	16	17	19														
9									9	9	10	10	10	11	11	11	12	12	12	13	13	15	16	17	18	20														
10										10	10	11	11	12	12	12	13	13	14	14	15	17	18	19	21															
11											11	11	12	12	13	13	13	14	14	14	15	16	18	19	20	22														
12												12	12	13	13	14	14	14	15	15	15	17	18	20	21	23														
13													13	13	14	14	15	15	16	16	18	19	21	22	24															
14														14	14	15	15	16	16	16	17	18	20	22	23	25														
15															15	15	16	16	17	17	19	21	22	24	26															
16																16	16	17	17	18	20	22	23	25	27															
17																	17	17	18	18	20	22	24	25	28															
18																		18	18	19	21	23	25	26	29															
19																			19	19	22	24	25	27	30															
20																				20	22	24	26	28	31															
25																					25	27	29	31	35															
30																						30	32	34	38															
35																							35	37	41															
40																								40	44															
50																									50															

**Ejemplo 1:** Se tiene una muestra de suelo obtenida de una calicata para analizar en laboratorio. El suelo se compacta a la densidad de terreno y se realiza el ensayo CBR, obteniéndose una resistencia CBR=5%. Sobre el mismo suelo se realiza el ensayo CBR pero con el suelo compactado al 95% de la DMCS, obteniéndose una resistencia CBR=14%. El CBR Combinado de diseño es por lo tanto CBR=8% correspondiente al rango de suelo S4.

**Ejemplo 2:** Se tiene una muestra de suelo obtenida de una calicata para analizar en laboratorio. El suelo se compacta a la densidad de terreno y se realiza el ensayo CBR, obteniéndose una resistencia CBR=8%. Sobre el mismo suelo se realiza el ensayo CBR pero con el suelo compactado al 95% de la DMCS, obteniéndose una resistencia CBR=20%. El CBR Combinado de diseño es por lo tanto CBR=12% correspondiente al rango de suelo S5.

Una vez calculados los CBR combinados para cada punto se debe seguir el ‘método del ingeniero’ para determinar el CBR a utilizar en el proyecto. Este método consiste en aplicar un criterio estadístico para identificar: 1) tramos homogéneos y 2) definir el CBR de diseño de dicho tramo. El procedimiento es el siguiente:

- Graficar los valores de CBR combinados obtenidos cada 100 metros aproximadamente.
- Identificar tramos homogéneos. Un tramo homogéneo se define como una sección del camino que tiene valores de CBR combinados relativamente similares. Esto se debe verificar matemáticamente de forma tal que la desviación estándar ( $\sigma$ ) de los CBR combinados de dicho tramo dividido por la media ( $\mu$ ) de los CBR combinados sea menor a 0.5.
- Para cada tramo definido según el criterio anterior, se debe obtener el percentil 70% de CBR combinado. Esto significa que el valor de CBR combinado de diseño corresponde al que está por debajo del 70% de los CBR combinados de dicho tramo.

**Ejemplo:** La Figura 47 presenta un ejemplo de aplicación del método del ingeniero, donde se han graficado los valores de CBR combinados en un mismo predio. Al graficar los CBR combinados según su ubicación es posible identificar tramos del predio donde se tiene una capacidad de soporte relativamente homogénea. Por ejemplo, se identifica el Tramo 1, el cual en general tiene suelos con un CBR combinado menores a los del Tramo 2. Se comprueba para el Tramo 1 y 2 que la desviación estándar ( $\sigma$ ) dividida por la media ( $\mu$ ) de los CBR combinados para dichos tramos es menor a 0.5. En el caso que no sea así se debe crear otro tramo y volver a verificar la condición matemática. Para definir el CBR combinado de diseño de cada tramo se considera el percentil 70%, es decir, el 70% de los puntos se encuentra por sobre el CBR de diseño.

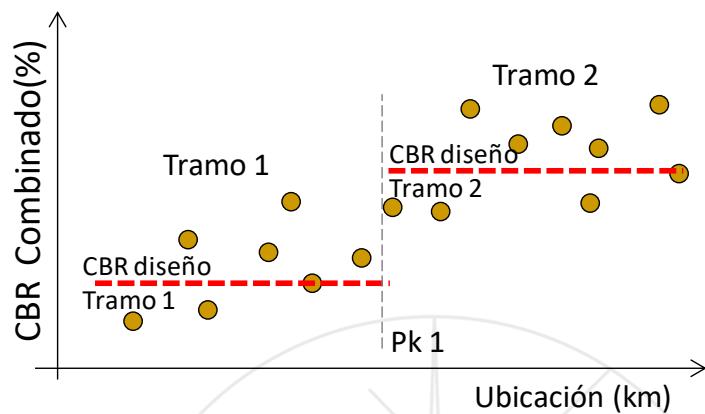


Figura 47: Ejemplo de aplicación del método del ingeniero para CBR de diseño de subrasante

### Paso 3 - Definir categoría de tránsito

Para definir el rango de tránsito se debe contar con la información del volumen de madera que tributa cada camino a diseñar. Para esto es necesario contar con la planificación de cosecha para la temporada y el cálculo de los metros cúbicos de madera que se transportará en cada camino (Figura 48).

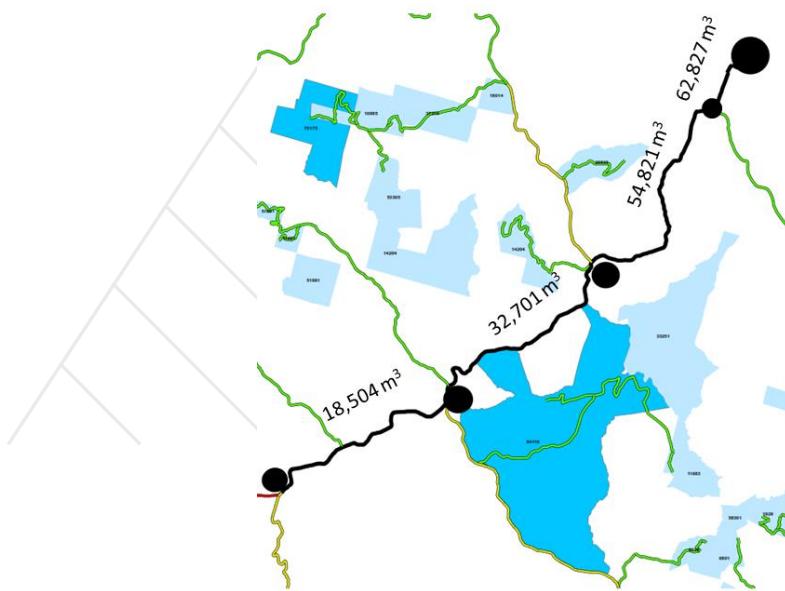


Figura 48: Ejemplo de metros cúbicos de madera a transportar en cada camino

#### Paso 4 – Elección Final de la Solución

Para elegir la solución final se deben identificar las hasta 7 soluciones de las cartillas de clima normal o lluvioso de acuerdo al Paso 1. Si dentro de las soluciones factibles se encuentran las de las cartillas 7 a 14, se debe volver a realizar el cálculo del rango de suelo para esas cartillas, pero con el CBR a densidad natural en vez del CBR combinado (en las cartillas 7 a 14 se ingresa con el CBR a densidad natural).

Una vez elegidas todas las soluciones se debe asignar un costo a cada diseño, utilizando los valores de cada proyecto en particular. Luego, se deben ordenar las soluciones de menor a mayor costo.

La solución a adoptar debiera ser la que tiene un menor costo dentro de las opciones que entregan las cartillas.

#### 5.e.v. Cartillas de Diseño

##### Nomenclatura

	Base granular o ripio CBR 80%
	Subbase CBR 40%
	Material de Mejoramiento
	Base granular o ripio CBR 80% con geomalla
	Base granular o ripio CBR 80% con geotextil

ESPECIFICACIONES CARTILLA N°1	
SOLUCIÓN	Monocapa Granular
CLIMA	Normal
RANGO DE TRÁNSITO	T1 (< 2500 m <sup>3</sup> ) a T9 (> 600,000 m <sup>3</sup> )
RANGOS DE SUELOS	S2 (2% < CBR < 3%) a S10 (CBR > 20%)
BASE	Granular CBR 80 %
	 <p>Espesor de Capas en (cm)</p>

Nota: Solución tradicional donde se extiende una sola capa de material de base sobre la subrasante o plataforma. Se recomienda utilizar esta solución donde existe acceso a material granular a un costo razonable, y donde la calidad de los suelos de subrasante es regular a buena. No se consideran soluciones de espesores mayor a 30 cm por seguridad de la operación.

Cartilla N°1: Monocapa clima normal									
	T1 Menos a 2,500 m <sup>3</sup>	T2 2,500-5,000 m <sup>3</sup>	T3 5,000 – 15,000 m <sup>3</sup>	T4 15,000-30,000 m <sup>3</sup>	T5 30,000-50,000 m <sup>3</sup>	T6 50,000 – 100,000 m <sup>3</sup>	T7 100,000-300,000 m <sup>3</sup>	T8 300,000-600,000 m <sup>3</sup>	T9 Mayor a 600,000 m <sup>3</sup>
S1 (CBR < 2%)									
S2 (2% < CBR < 3%)	28	30							
S3 (3% < CBR < 4%)	25	26	28	29	30				
S4 (4% < CBR < 6%)	22	24	25	26	27	28	30		
S5 (6% < CBR < 7%)	19	20	21	22	23	24	25	27	27
S6 (7% < CBR < 10%)	18	19	20	21	21	22	24	25	25
S7 (10% < CBR < 13%)	15	16	17	18	18	19	20	22	22
S8 (13% < CBR < 15%)	12	13	14	15	16	17	18	19	20
S9 (15% < CBR < 20%)	12	12	12	13	14	15	16	17	17
S10 (CBR > 20%)	12	12	12	12	13	14	15	16	17

ESPECIFICACIONES CARTILLA N°2	
SOLUCIÓN	Monocapa Granular
CLIMA	Lluvioso
RANGO DE TRÁNSITO	T1 (< 2500 m <sup>3</sup> ) a T9 (> 600,000 m <sup>3</sup> )
RANGOS DE SUELOS	S3 (3% < CBR < 4%) a S7 (CBR > 20%)
BASE	Granular CBR 80 %
	 <p>Espesor de Capas en (cm)</p>

Nota: Solución tradicional donde se extiende una sola capa de material de base sobre la subrasante o plataforma. Se recomienda utilizar esta solución donde existe acceso a material granular a un costo razonable, y donde la calidad de los suelos de subrasante es regular a buena. No se consideran soluciones de espesores mayor a 30 cm por seguridad de la operación.

Cartilla N°2: Monocapa clima lluvioso									
	T1 Menos a 2,500 m <sup>3</sup>	T2 2,500-5,000 m <sup>3</sup>	T3 5,000 – 15,000 m <sup>3</sup>	T4 15,000-30,000 m <sup>3</sup>	T5 30,000-50,000 m <sup>3</sup>	T6 50,000 – 100,000 m <sup>3</sup>	T7 100,000-300,000 m <sup>3</sup>	T8 300,000-600,000 m <sup>3</sup>	T9 Mayor a 600,000 m <sup>3</sup>
S1 (CBR < 2%)									
S2 (2% < CBR < 3%)									
S3 (3% < CBR < 4%)	 27	 29	 30						
S4 (4% < CBR < 6%)	 24	 26	 27	 28	 29	 30			
S5 (6% < CBR < 7%)	 21	 22	 23	 24	 25	 26	 28	 29	 30
S6 (7% < CBR < 10%)	 19	 20	 21	 23	 23	 24	 26	 27	 28
S7 (10% < CBR < 13%)	 16	 17	 18	 19	 20	 21	 22	 23	 24
S8 (13% < CBR < 15%)	 15	 15	 16	 17	 18	 18	 20	 21	 21
S9 (15% < CBR < 20%)	 15	 15	 15	 15	 15	 16	 17	 19	 19
S10 (CBR > 20%)	 15	 15	 15	 15	 15	 15	 17	 18	 18

ESPECIFICACIONES CARTILLA N°3	
SOLUCIÓN	Bicapa Granular
CLIMA	Normal
RANGO DE TRÁNSITO	T1 (< 2500 m <sup>3</sup> ) a T9 (> 600,000 m <sup>3</sup> )
RANGOS DE SUELOS	S2 (2% < CBR < 3%) a S10 (CBR > 20%)
BASE	Granular CBR 80 %
SUBBASE	Granular CBR 40 %
 <p>Espesor de Capas en (cm)</p>	

Nota: Solución tradicional donde se extiende una primera capa de material de subbase y sobre ésta la capa de material de base. Se recomienda utilizar esta solución donde existe acceso a material de subbase granular a un relativo bajo costo, y donde la calidad de los suelos de subrasante es regular a buena. No se consideran soluciones de espesor mayor a 38 cm por seguridad de la operación.

Cartilla N°3: Bicapa clima normal									
	T1 Menos a 2,500 m <sup>3</sup>	T2 2,500-5,000 m <sup>3</sup>	T3 5,000 – 15,000 m <sup>3</sup>	T4 15,000-30,000 m <sup>3</sup>	T5 30,000-50,000 m <sup>3</sup>	T6 50,000 – 100,000 m <sup>3</sup>	T7 100,000-300,000 m <sup>3</sup>	T8 300,000-600,000 m <sup>3</sup>	T9 Mayor a 600,000 m <sup>3</sup>
S1 (CBR < 2%)									
S2 (2% < CBR < 3%)	 13 20	 14 22							
S3 (3% < CBR < 4%)	 12 18	 12 19	 13 20	 14 21	 14 22				
S4 (4% < CBR < 6%)	 12 16	 12 17	 12 18	 12 19	 13 19	 13 20	 14 22	 15 22	 15 23
S5 (6% < CBR < 7%)	 12 15	 12 15	 12 15	 12 16	 12 17	 12 17	 12 18	 13 19	 13 19
S6 (7% < CBR < 10%)	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 16	 12 17	 12 18	 12 18
S7 (10% < CBR < 13%)	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 16	 12 16
S8 (13% < CBR < 15%)	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15
S9 (15% < CBR < 20%)	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15
S10 (CBR > 20%)	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15

ESPECIFICACIONES CARTILLA N°4	
SOLUCIÓN	Bicapa Granular
CLIMA	Lluvioso
RANGO DE TRÁNSITO	T1 (< 2500 m <sup>3</sup> ) a T9 (> 600,000 m <sup>3</sup> )
RANGOS DE SUELOS	S3 (3% < CBR < 4%) a S10 (CBR > 20%)
BASE	Granular CBR 80 %
SUBBASE	Granular CBR 40 %
<p>Espesor de Capas en (cm)</p>	

Nota: Solución tradicional donde se extiende una primera capa de material de subbase y sobre ésta la capa de material de base. Se recomienda utilizar esta solución donde existe acceso a material de subbase granular a un relativo bajo costo, y donde la calidad de los suelos de subrasante es regular a buena. No se consideran soluciones de espesores mayor a 38 cm por seguridad de la operación.

	T1 Menos a 2,500 m <sup>3</sup>	T2 2,500-5,000 m <sup>3</sup>	T3 5,000 – 15,000 m <sup>3</sup>	T4 15,000-30,000 m <sup>3</sup>	T5 30,000-50,000 m <sup>3</sup>	T6 50,000 – 100,000 m <sup>3</sup>	T7 100,000-300,000 m <sup>3</sup>	T8 300,000-600,000 m <sup>3</sup>	T9 Mayor a 600,000 m <sup>3</sup>
S1 (CBR < 2%)									
S2 (2% < CBR < 3%)									
S3 (3% < CBR < 4%)	 13 19	 14 21	 14 22						
S4 (4% < CBR < 6%)	 12 17	 12 19	 13 19	 13 20	 14 21	 14 22			
S5 (6% < CBR < 7%)	 12 15	 12 16	 12 17	 12 17	 12 18	 12 19	 13 20	 14 21	 14 22
S6 (7% < CBR < 10%)	 12 15	 12 15	 12 15	 12 17	 12 17	 12 17	 12 19	 13 19	 13 20
S7 (10% < CBR < 13%)	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 16	 12 17	 12 17
S8 (13% < CBR < 15%)	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15
S9 (15% < CBR < 20%)	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15
S10 (CBR > 20%)	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15	 12 15

ESPECIFICACIONES CARTILLA N°5	
SOLUCIÓN	Monocapa con mejoramiento
CLIMA	Normal
RANGO DE TRÁNSITO	T1 (< 2500 m <sup>3</sup> ) a T9 (> 600,000 m <sup>3</sup> )
RANGOS DE SUELOS	S1 (CBR < 2%) a S6 (7% < CBR < 10%)
Nota:	Se debe bajar el nivel de la plataforma tal que el espesor de la monocapa no supere los 40 cm
BASE	Granular CBR 80 %
MEJORAMIENTO	Granular Tamaño Máximo 5"
 <p>Espesor de Capas en (cm)</p>	

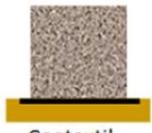
**Nota:** Solución donde se extiende una primera capa de material de TM 6" para mejorar la subrasante existente. Sobre el mejoramiento se extiende la capa de material de base. Se recomienda utilizar esta solución donde el costo de los áridos de base es relativamente alto, y donde la calidad de los suelos de subrasante es mala a regular.

Cartilla N°5: Monocapa con mejoramiento clima normal									
	T1 Menos a 2,500 m <sup>3</sup>	T2 2,500-5,000 m <sup>3</sup>	T3 5,000 – 15,000 m <sup>3</sup>	T4 15,000-30,000 m <sup>3</sup>	T5 30,000-50,000 m <sup>3</sup>	T6 50,000 – 100,000 m <sup>3</sup>	T7 100,000-300,000 m <sup>3</sup>	T8 300,000-600,000 m <sup>3</sup>	T9 Mayor a 600,000 m <sup>3</sup>
S1 (CBR < 2%)	15 25	16 25	16 28	17 28	18 28	18 28	19 30	20 30	21 30
S2 (2% < CBR < 3%)	13 22	14 22	14 25	15 25	15 25	16 25	17 28	18 28	18 30
S3 (3% < CBR < 4%)	12 20	13 22	13 22	14 22	14 25	14 25	16 25	16 28	16 28
S4 (4% < CBR < 6%)	12 20	12 20	12 20	13 22	13 22	14 22	14 25	16 25	16 25
S5 (6% < CBR < 7%)	12 20	12 20	12 20	12 20	12 20	13 22	14 22	14 25	14 25
S6 (7% < CBR < 10%)	12 20	12 20	12 20	12 20	12 20	13 20	13 22	14 22	14 22
S7 (10% < CBR < 13%)									
S8 (13% < CBR < 15%)									
S9 (15% < CBR < 20%)									
S10 (CBR > 20%)									

ESPECIFICACIONES CARTILLA N°6	
SOLUCIÓN	Monocapa con mejoramiento
CLIMA	Lluvioso
RANGO DE TRÁNSITO	T1 (< 2500 m <sup>3</sup> ) a T9 (> 600,000 m <sup>3</sup> )
RANGOS DE SUELOS	S1 (CBR < 2%) a S6 (7% < CBR < 10%)
Nota:	Se debe bajar el nivel de la plataforma tal que el espesor de la monocapa no supere los 40 cm
BASE	Granular CBR 80 %
MEJORAMIENTO	Granular Tamaño Máximo 5"
	
	Espesor de Capas en (cm)

Nota: Solución donde se extiende una primera capa de material de TM 6" para mejorar la subrasante existente. Sobre el mejoramiento se extiende la capa de material de base. Se recomienda utilizar esta solución donde el costo de los áridos de base es relativamente alto, y donde la calidad de los suelos de subrasante es mala a regular.

Cartilla N°6: Monocapa con mejoramiento clima lluvioso									
	T1 Menos a 2,500 m <sup>3</sup>	T2 2,500-5,000 m <sup>3</sup>	T3 5,000 – 15,000 m <sup>3</sup>	T4 15,000-30,000 m <sup>3</sup>	T5 30,000-50,000 m <sup>3</sup>	T6 50,000 – 100,000 m <sup>3</sup>	T7 100,000-300,000 m <sup>3</sup>	T8 300,000-600,000 m <sup>3</sup>	T9 Mayor a 600,000 m <sup>3</sup>
S1 (CBR < 2%)	16 28	16 28	17 30	18 30	19 30	19 30	21 30	22 30	22 30
S2 (2% < CBR < 3%)	14 22	14 25	15 25	16 25	16 28	17 28	18 30	19 30	19 30
S3 (3% < CBR < 4%)	13 20	14 22	15 22	14 25	15 25	16 25	16 28	17 28	18 28
S4 (4% < CBR < 6%)	12 20	13 20	14 22	14 22	15 22	15 25	16 25	16 28	17 28
S5 (6% < CBR < 7%)	12 20	12 20	12 20	14 20	14 20	14 22	14 25	15 25	16 25
S6 (7% < CBR < 10%)	12 20	12 20	12 20	12 20	13 20	14 20	14 22	15 25	15 25
S7 (10% < CBR < 13%)									
S8 (13% < CBR < 15%)									
S9 (15% < CBR < 20%)									
S10 (CBR > 20%)									

ESPECIFICACIONES CARTILLA N°7	
SOLUCIÓN	Monocapa Granular con Geosintético
CLIMA	Normal
RANGO DE TRÁNSITO	T1 (< 2500 m <sup>3</sup> ) a T9 (> 600,000 m <sup>3</sup> )
RANGOS DE SUELOS	S1 (< 2%) a S6 (7% < CBR < 10%)
Nota: Recordar que se debe ingresar con el CBR a densidad natural en este caso	
BASE	Granular CBR 80 %
Geosintético	Geomalla si suelo es S1-S3
Geosintético	Geotextil si suelo es S4-S6
	
Espesor de Capas en (cm)	

Nota: Solución donde se extiende la tela geosintética sobre el suelo existente, el cual tiene efecto de aumentar la capacidad de soporte de la subrasante. Se recomienda utilizar esta solución donde el costo de los áridos es muy alto, y la calidad de los suelos de subrasante es mala a regular. Si el suelo existente clasifica como S1, S2 o S3 se recomienda el uso de geomalla, para las otras clasificaciones, se recomienda el uso de geotextil.

En este caso se debe ingresar a la cartilla con el CBR a densidad natural, debido a que en la construcción con geosintéticos no se requiere compactar la subrasante. Por este motivo, los rangos de suelo de la cartilla tienen un color amarillo, con el objetivo de diferenciar la metodología utilizada en el ingreso del rango de suelo en las cartillas 1 a 6.

Cartilla N°7: Monocapa con geosintético clima normal									
	T1 Menos a 2,500 m <sup>3</sup>	T2 2,500-5,000 m <sup>3</sup>	T3 5,000 – 15,000 m <sup>3</sup>	T4 15,000-30,000 m <sup>3</sup>	T5 30,000-50,000 m <sup>3</sup>	T6 50,000 – 100,000 m <sup>3</sup>	T7 100,000-300,000 m <sup>3</sup>	T8 300,000-600,000 m <sup>3</sup>	T9 Mayor a 600,000 m <sup>3</sup>
S1 (CBR < 2%)									
S2 (2% < CBR < 3%)									
S3 (3% < CBR < 4%)									
S4 (4% < CBR < 6%)									
S5 (6% < CBR < 7%)									
S6 (7% < CBR < 10%)									
S7 (10% < CBR < 13%)									
S8 (13% < CBR < 15%)									
S9 (15% < CBR < 20%)									
S10 (CBR > 20%)									

ESPECIFICACIONES CARTILLA N°8	
SOLUCIÓN	Monocapa Granular con Geosintético
CLIMA	Lluvioso
RANGO DE TRÁNSITO	T1 (< 2500 m <sup>3</sup> ) a T9 (> 600,000 m <sup>3</sup> )
RANGOS DE SUELOS	S1 (CBR < 2%) a S6 (7% < CBR < 10%)
Nota: Recordar que se debe ingresar con el CBR a densidad natural en este caso	
BASE	Granular CBR 80 %
Geosintético	Geomalla si suelo es S1-S3
Geosintético	Geotextil si suelo es S4-S6
	
Espesor de Capas en (cm)	

Nota: Solución donde se extiende la tela geosintética sobre el suelo existente, el cual tiene efecto de aumentar la capacidad de soporte de la subrasante. Se recomienda utilizar esta solución donde el costo de los áridos es muy alto, y la calidad de los suelos de subrasante es mala a regular. Si el suelo existente clasifica como S1, S2 o S3 se recomienda el uso de geomalla, para los otras clasificaciones, se recomienda el uso de geotextil.

En este caso se debe ingresar a la cartilla con el CBR a densidad natural, debido a que en la construcción con geosintéticos no se requiere compactar la subrasante. Por este motivo, los rangos de suelo de la cartilla tienen un color amarillo, con el objetivo de diferenciar la metodología utilizada en el ingreso del rango de suelo en las cartillas 1 a 6.

Cartilla N°8: Monocapa con geosintético clima lluvioso									
	T1 Menos a 2,500 m <sup>3</sup>	T2 2,500-5,000 m <sup>3</sup>	T3 5,000 – 15,000 m <sup>3</sup>	T4 15,000-30,000 m <sup>3</sup>	T5 30,000-50,000 m <sup>3</sup>	T6 50,000 – 100,000 m <sup>3</sup>	T7 100,000-300,000 m <sup>3</sup>	T8 300,000-600,000 m <sup>3</sup>	T9 Mayor a 600,000 m <sup>3</sup>
S1 (CBR < 2%)									
S2 (2% < CBR < 3%)									
S3 (3% < CBR < 4%)									
S4 (4% < CBR < 6%)									
S5 (6% < CBR < 7%)									
S6 (7% < CBR < 10%)									
S7 (10% < CBR < 13%)									
S8 (13% < CBR < 15%)									
S9 (15% < CBR < 20%)									
S10 (CBR > 20%)									

ESPECIFICACIONES CARTILLA N°9	
SOLUCIÓN	Monocapa estabilizado
CLIMA	Normal
RANGO DE TRÁNSITO	T1 (< 2500 m <sup>3</sup> ) a T9 (> 600,000 m <sup>3</sup> )
RANGOS DE SUELOS	S1 (CBR < 2%) a S6 (7% < CBR < 10%)
Nota: Recordar que se debe ingresar con el CBR a densidad natural en este caso	
BASE	Granular CBR 80 %
Subrasante Estabilizada	Algún tipo de estabilización química
 Espesor de Capas en (cm)	

Nota: Solución que contempla la estabilización de 25 cm de la subrasante mediante algún aditivo o tecnología química que haya sido probada y aprobada en terreno. El efecto de la estabilización química debe ser de al menos duplicar el valor del CBR medido al 95% de la DMCS. Sobre el estabilizado se utiliza una capa de base granular. Se recomienda utilizar esta solución donde el costo de los áridos es muy alto, y la calidad de los suelos de subrasante es mala a regular.

En este caso se debe ingresar a la cartilla con el CBR a densidad natural, por este motivo, los rangos de suelo de la cartilla tienen un color amarillo, con el objetivo de diferenciar la metodología utilizada en el ingreso del rango de suelo en las cartillas 1 a 6.

Cartilla N°9: Monocapa estabilizado clima normal									
	T1 Menos a 2,500 m <sup>3</sup>	T2 2,500-5,000 m <sup>3</sup>	T3 5,000 – 15,000 m <sup>3</sup>	T4 15,000-30,000 m <sup>3</sup>	T5 30,000-50,000 m <sup>3</sup>	T6 50,000 – 100,000 m <sup>3</sup>	T7 100,000-300,000 m <sup>3</sup>	T8 300,000-600,000 m <sup>3</sup>	T9 Mayor a 600,000 m <sup>3</sup>
S1 (CBR < 2%)	19	20	21	22	23	24	25	27	27
S2 (2% < CBR < 3%)	18	19	20	21	21	22	24	25	25
S3 (3% < CBR < 4%)	15	16	17	18	18	19	20	22	22
S4 (4% < CBR < 6%)	15	15	15	15	16	17	18	19	20
S5 (6% < CBR < 7%)	15	15	15	15	15	15	16	17	17
S6 (7% < CBR < 10%)	15	15	15	15	15	15	15	16	17
S7 (10% < CBR < 13%)									
S8 (13% < CBR < 15%)									
S9 (15% < CBR < 20%)									
S10 (CBR > 20%)									

ESPECIFICACIONES CARTILLA N°10	
SOLUCIÓN	Monocapa estabilizado
CLIMA	Lluvioso
RANGO DE TRÁNSITO	T1 (< 2500 m <sup>3</sup> ) a T9 (> 600,000 m <sup>3</sup> )
RANGOS DE SUELOS	S1 (CBR < 2%) a S6 (7% < CBR < 10%)
Nota: Recordar que se debe ingresar con el CBR a densidad natural en este caso	
BASE	Granular CBR 80 %
Subrasante Estabilizada	Algún tipo de estabilización química
 <b>Espesor de Capas en (cm)</b>	

Nota: Solución que contempla la estabilización de 25 cm de la subrasante mediante algún aditivo o tecnología química que haya sido probada y aprobada en terreno. El efecto de la estabilización química debe ser de al menos duplicar el valor del CBR medido al 95% de la DMCS. Sobre el estabilizado se utiliza una capa de base granular. Se recomienda utilizar esta solución donde el costo de los áridos es muy alto, y la calidad de los suelos de subrasante es mala a regular.

En este caso se debe ingresar a la cartilla con el CBR a densidad natural, por este motivo, los rangos de suelo de la cartilla tienen un color amarillo, con el objetivo de diferenciar la metodología utilizada en el ingreso del rango de suelo en las cartillas 1 a 6.

Cartilla N°10: Monocapa estabilizado clima lluvioso									
	T1 Menos a 2,500 m <sup>3</sup>	T2 2,500-5,000 m <sup>3</sup>	T3 5,000 – 15,000 m <sup>3</sup>	T4 15,000-30,000 m <sup>3</sup>	T5 30,000-50,000 m <sup>3</sup>	T6 50,000 – 100,000 m <sup>3</sup>	T7 100,000-300,000 m <sup>3</sup>	T8 300,000-600,000 m <sup>3</sup>	T9 Mayor a 600,000 m <sup>3</sup>
S1 (CBR < 2%)	21	22	23	24	25	26	28	29	30
S2 (2% < CBR < 3%)	19	20	21	23	23	24	26	27	28
S3 (3% < CBR < 4%)	16	17	18	19	20	21	22	23	24
S4 (4% < CBR < 6%)	15	15	16	17	18	18	20	21	21
S5 (6% < CBR < 7%)	15	15	15	15	15	16	17	19	19
S6 (7% < CBR < 10%)	15	15	15	15	15	15	17	18	18
S7 (10% < CBR < 13%)									
S8 (13% < CBR < 15%)									
S9 (15% < CBR < 20%)									
S10 (CBR > 20%)									

## 6. Balizado y Señalización

La circulación vehicular debe ser guiada y regulada de manera que pueda efectuarse de manera segura, ordenada y fluida. Por tales motivos, se hace necesario contar con balizaje y señalización adecuados en los caminos forestales para cumplir estos objetivos, guiando a los usuarios e informando oportunamente de cualquier situación que se precise.

Es responsabilidad de la Unidad de Caminos, dejar correctamente balizados los caminos una vez que se entreguen a la operación.

### 6.a. Balizaje durante la construcción

Finalizado el movimiento de tierra y previo a la construcción de las obras de saneamiento, se deberá realizar el balizado de los caminos cada 50 metros, por el lado del corte y en un lugar claramente visible, esta señalización debe permanecer finalizada la construcción y durante el uso del camino.

Las balizas deberán ser de color amarillo, con números negros y podrán ser de 3 tipos, según indican las figuras Figura 49, Figura 50 y Figura 51.

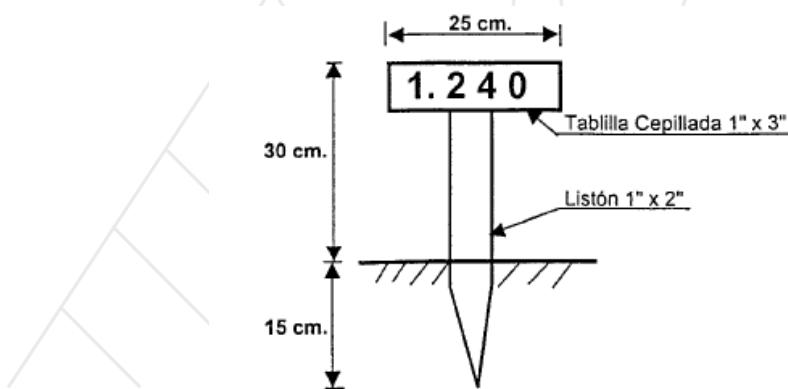


Figura 49: Baliza común en camino

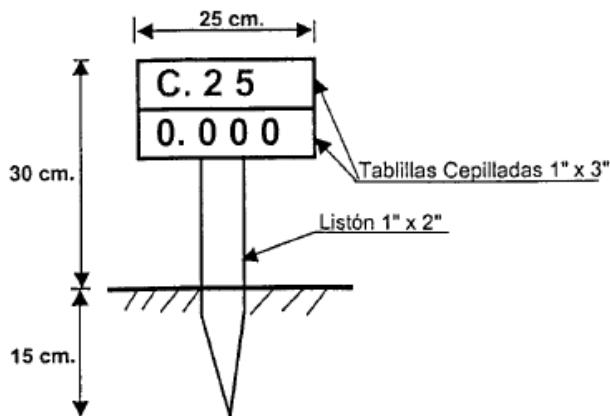


Figura 50: Baliza tipo, inicio de camino

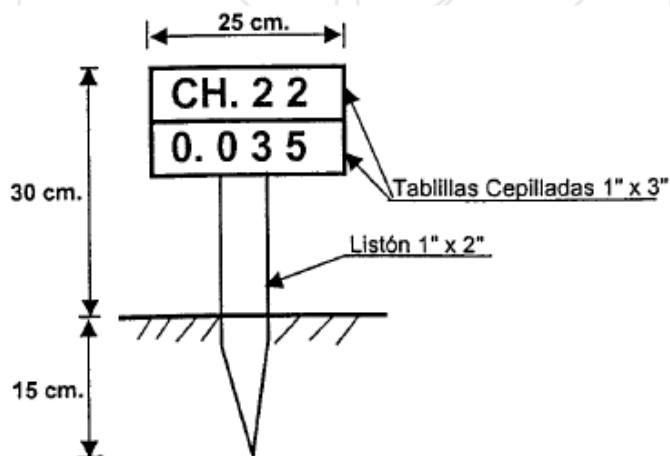


Figura 51: Baliza tipo, inicio y fin de cancha

### 6.b. Señalización terminada la construcción

Una vez concluida la construcción del camino, es decir, terminado el movimiento de tierra para los predios de verano y terminada la carpeta granular (u otro tipo de carpeta utilizada) para los predios de invierno, se procederá a señalizar los caminos de Forestal Arauco, como mínimo, donde se presenten las condiciones siguientes:

- ✓ Zona de quebradas
- ✓ Pendientes fuertes (fuera del estándar FASA)
- ✓ Puentes
- ✓ Peligro (informando el peligro que se está avisando)

La señalética será de acero laminado en caliente, aluminio, materiales sintéticos u otros que aseguran durabilidad y de color amarillo con negro según se indica en la Figura 52. Las placas de las señaléticas deberán estar circunscritas en un cuadrado de 0,50 metros como indica la Figura 53.



Figura 52: Señalización definitiva terminada la construcción

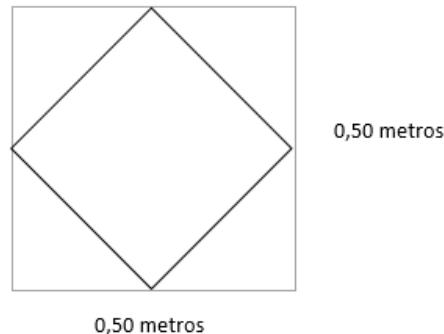


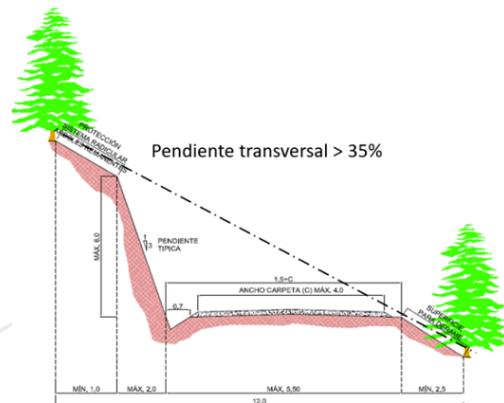
Figura 53: Dimensiones placa señalética

Toda señalética adicional que se utilice debe estar contemplada en el Manual de Señalización de Tránsito del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones de Chile, de modo que sea estándar y no se preste para confusión de los conductores.

#### 6.c. Delineadores

Una vez concluida la construcción del camino, es decir terminado el movimiento de tierra para los predios de verano y terminada la carpeta granular (u otro tipo de carpeta utilizada) para los predios de invierno, se procederá a instalar delineadores (Ver Figura 54) en los caminos de Forestal Arauco donde se presenten, como mínimo, las siguientes tres condiciones:

- ✓ Pendiente transversal del bosque superior a 35%



- ✓ Radio de giro de curva inferior a 45 metros
- ✓ Ángulo de la curva superior a 90°

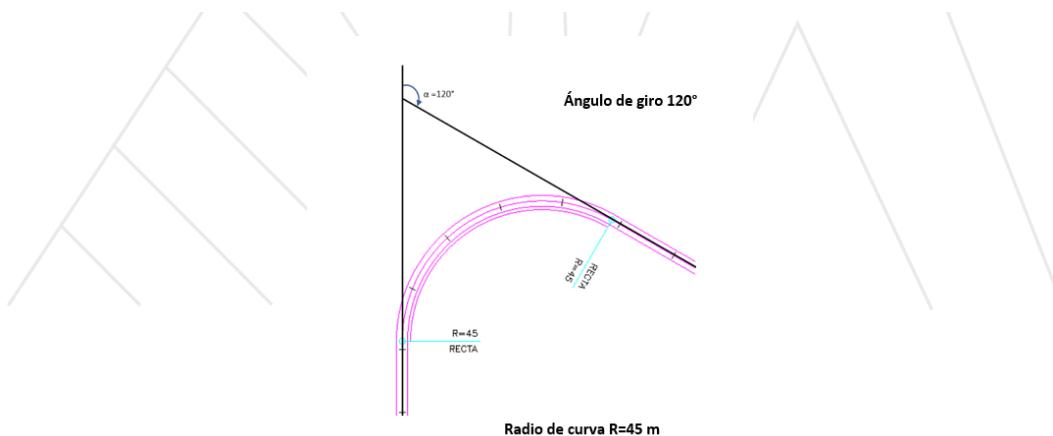
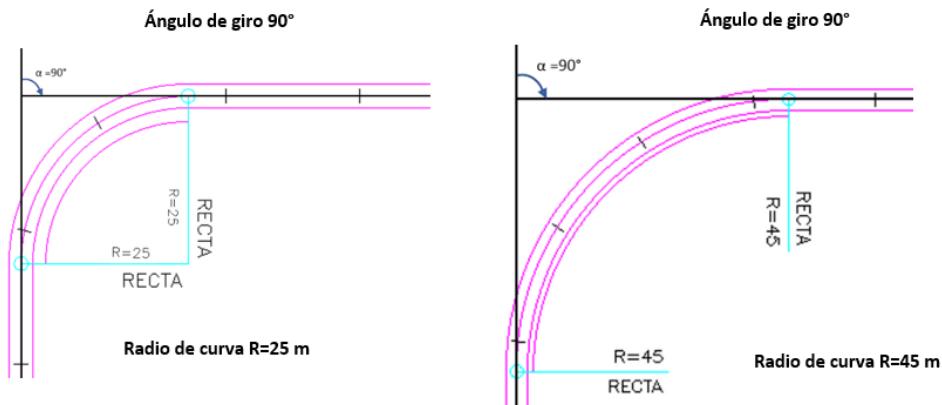




Figura 54: Delineador tipo

Los delineadores serán de madera, polín impregnado de diámetro 3" o 4", de colores naranjo y blanco y en la zona superior blanca del delineador, cinta blanca reflectante.

Se ubicarán a una distancia entre 0,20 y 0,30 metros del corte firme y espaciados a 3,0 a 4,0 metros uno del otro. Se colocarán como mínimo en todo el desarrollo de la curva, pudiendo si la condición lo requiere colocar 2, 3 ó más delineadores adicionales.

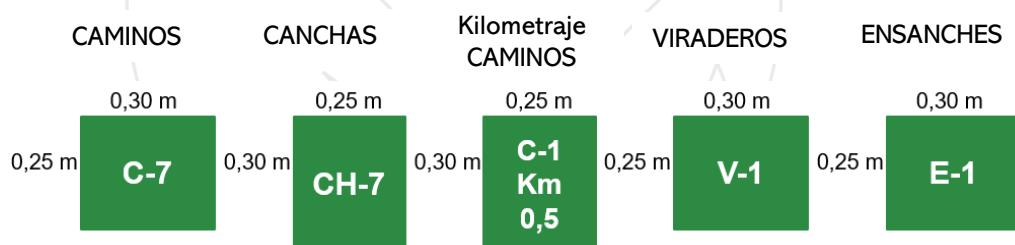


Imagen 4: Delineadores

#### 6.d. Señalización durante la operación.

Previo a que los predios comiencen a ser cosechados y los caminos a ser utilizados por transporte, deberán balizarse los caminos prediales, canchas, viraderos y ensanches, de modo que la baliza sea visible por ambos lados, siguiendo el siguiente estándar:

- Colores
  - Verde reflectivo grado ingeniería
  - Blanco reflectivo grado ingeniería
- Tipografía
  - Arial Bold (mayúscula)
- Material estructura
  - –25 x 30 cm, según letrero



Letreros de canchas y viraderos deben ir al ingreso de la cancha o el viradero unos 10 m antes de estos.

Letreros de caminos deben ir instalados al ingreso del camino unos 10 m iniciado éste y cada 500 m.

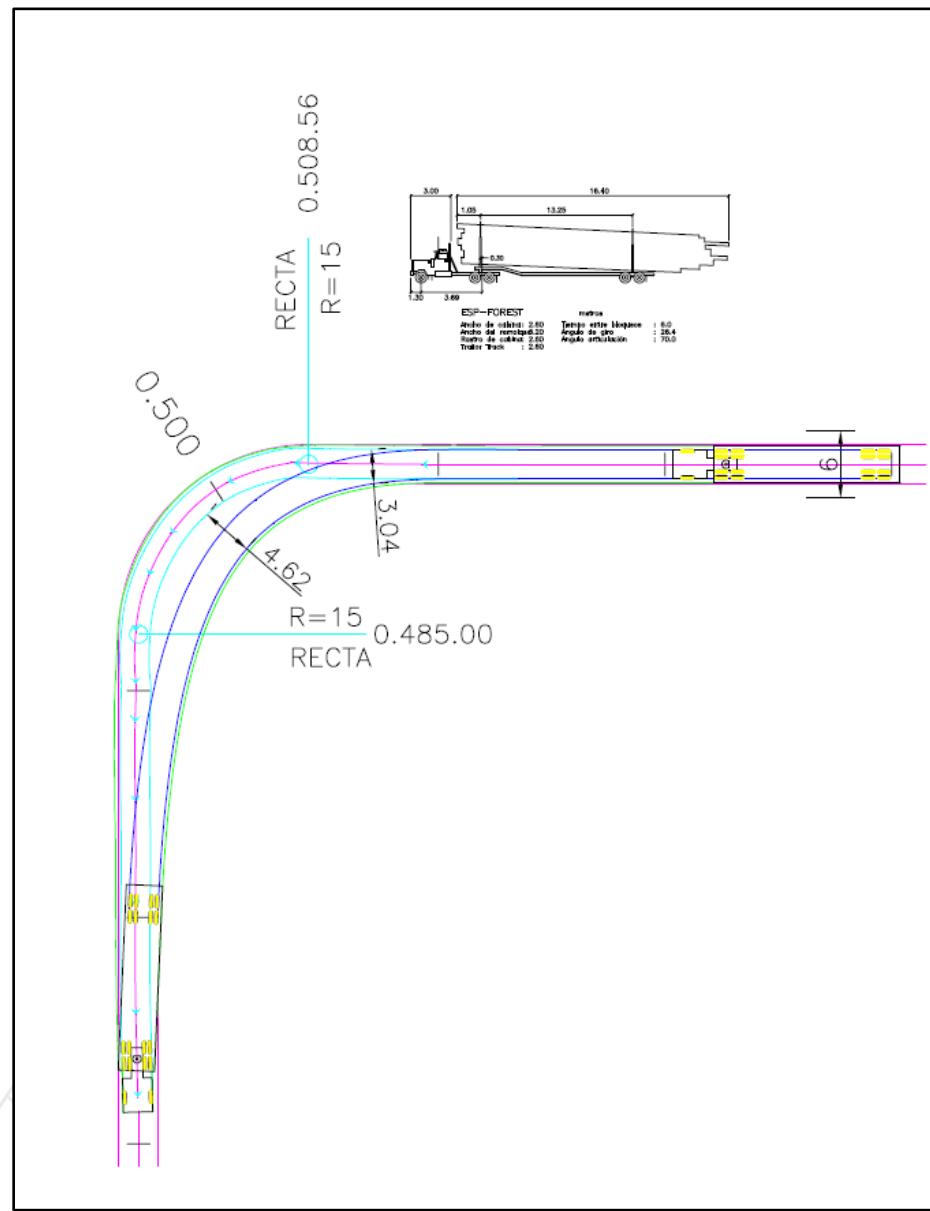
Para las bifurcaciones, instalados a 10 m iniciada la bifurcación.

La ubicación de estos en terreno (Izquierda / Derecha) va a depender de la topografía y visualización.

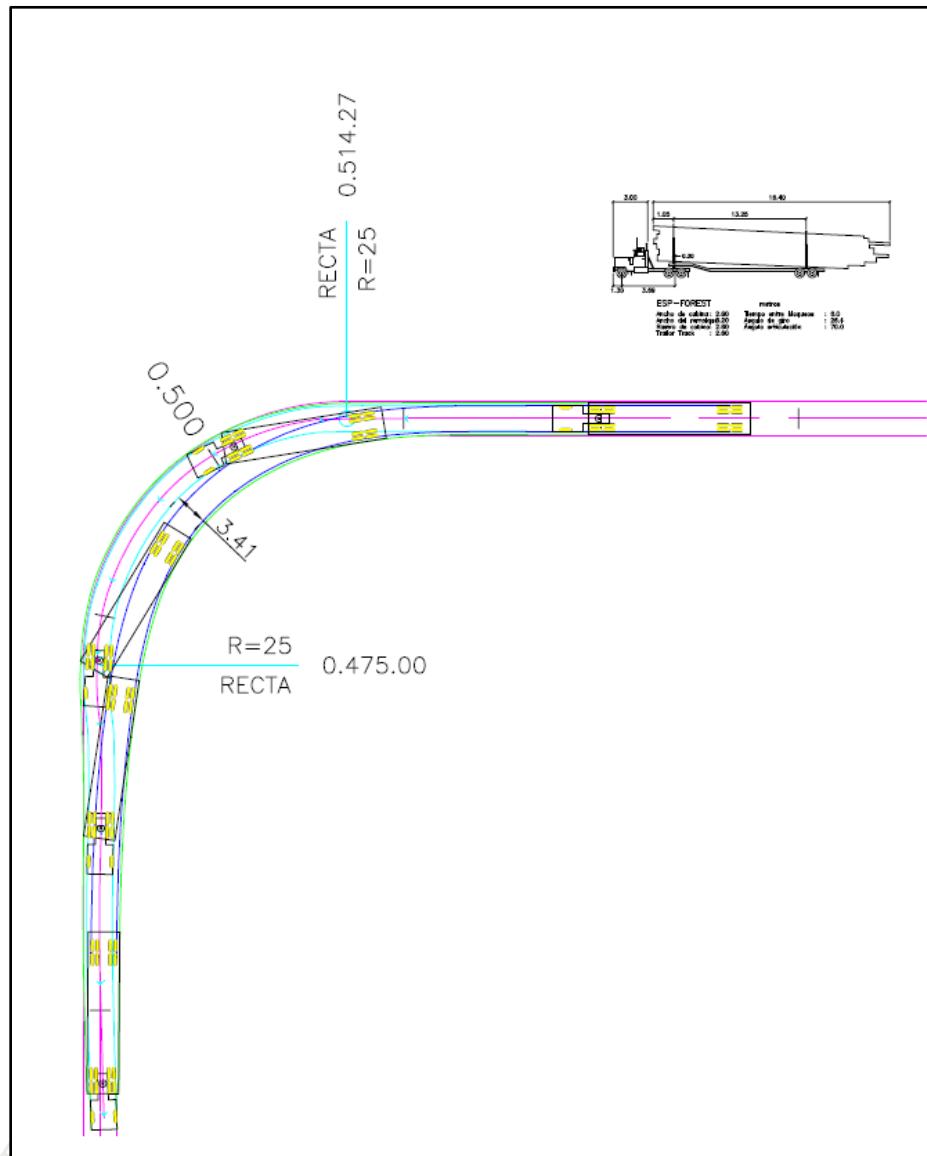


## ANEXO 1: Simulaciones de Trayectorias para definir sobreanchos en curvas

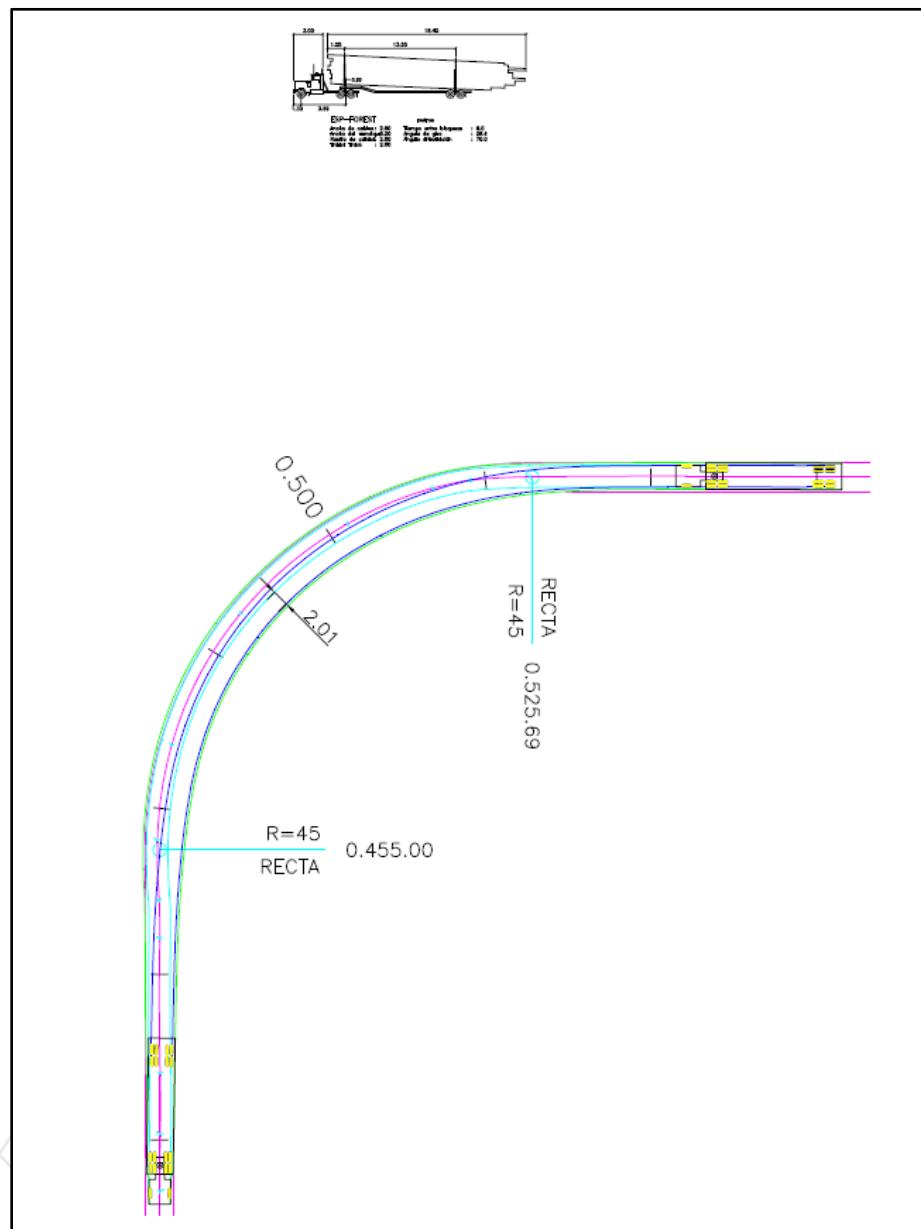
Ejes en 90°; radio de curva 15 m.



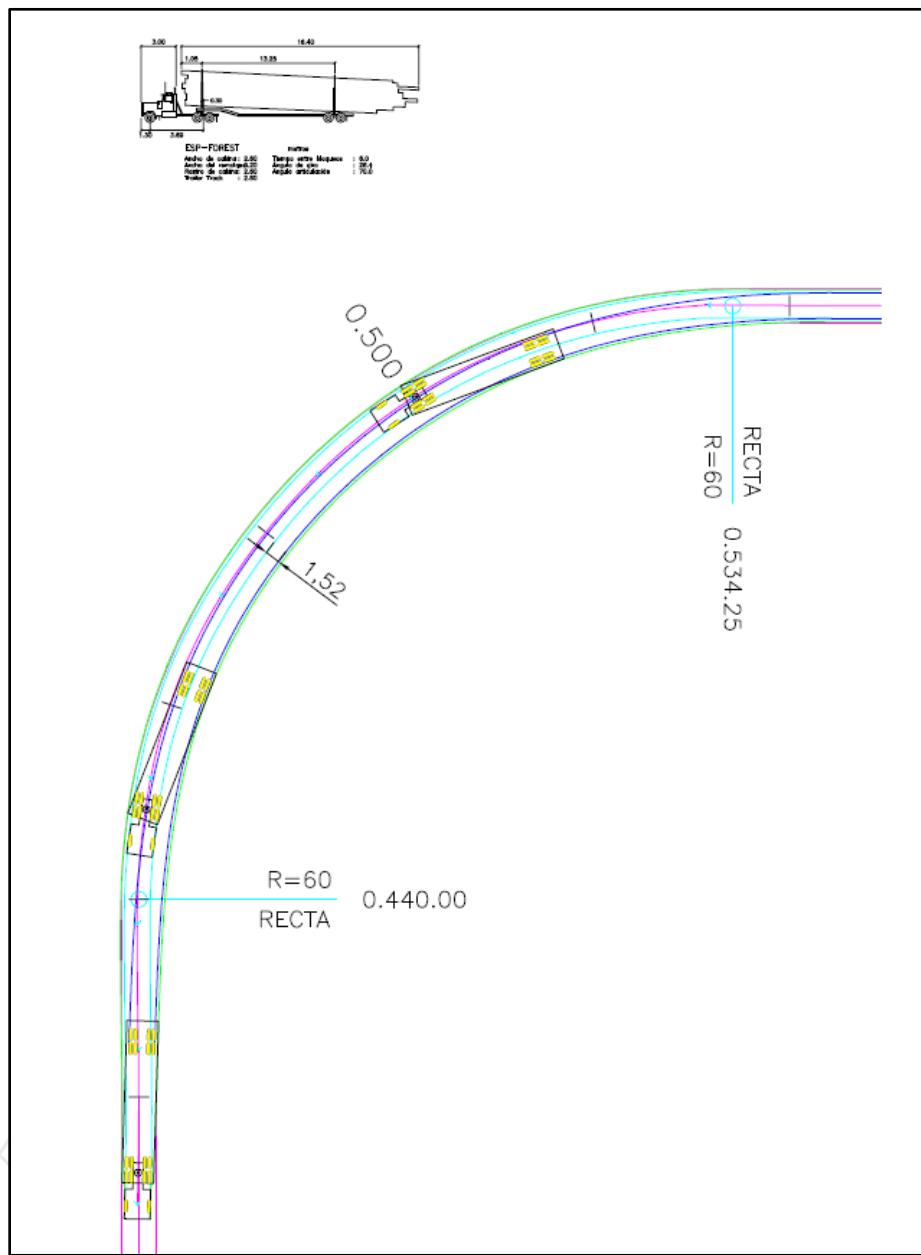
Ejes en 90°; radio de curva 25 m.



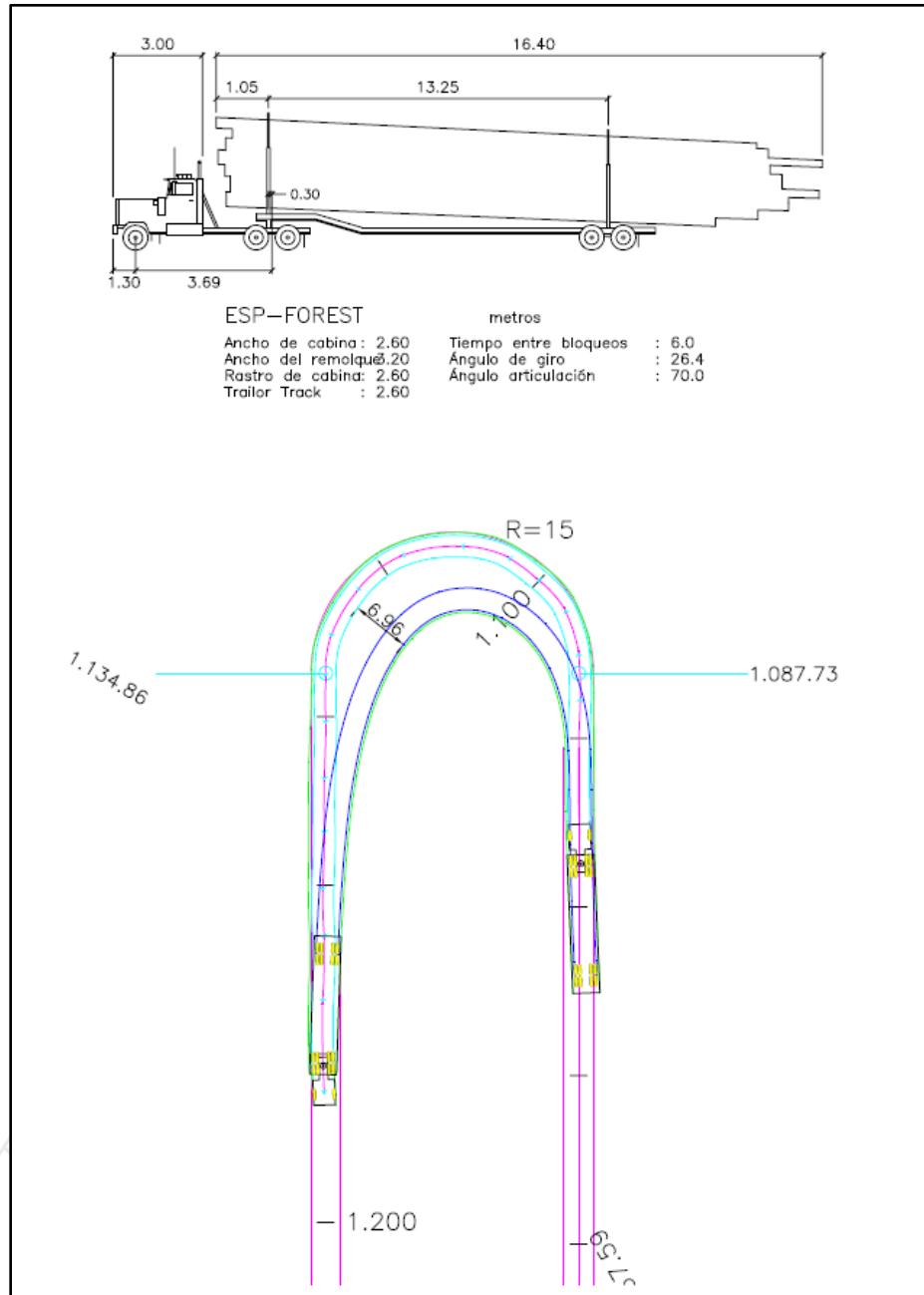
Ejes en 90°; radio de curva 45 m.



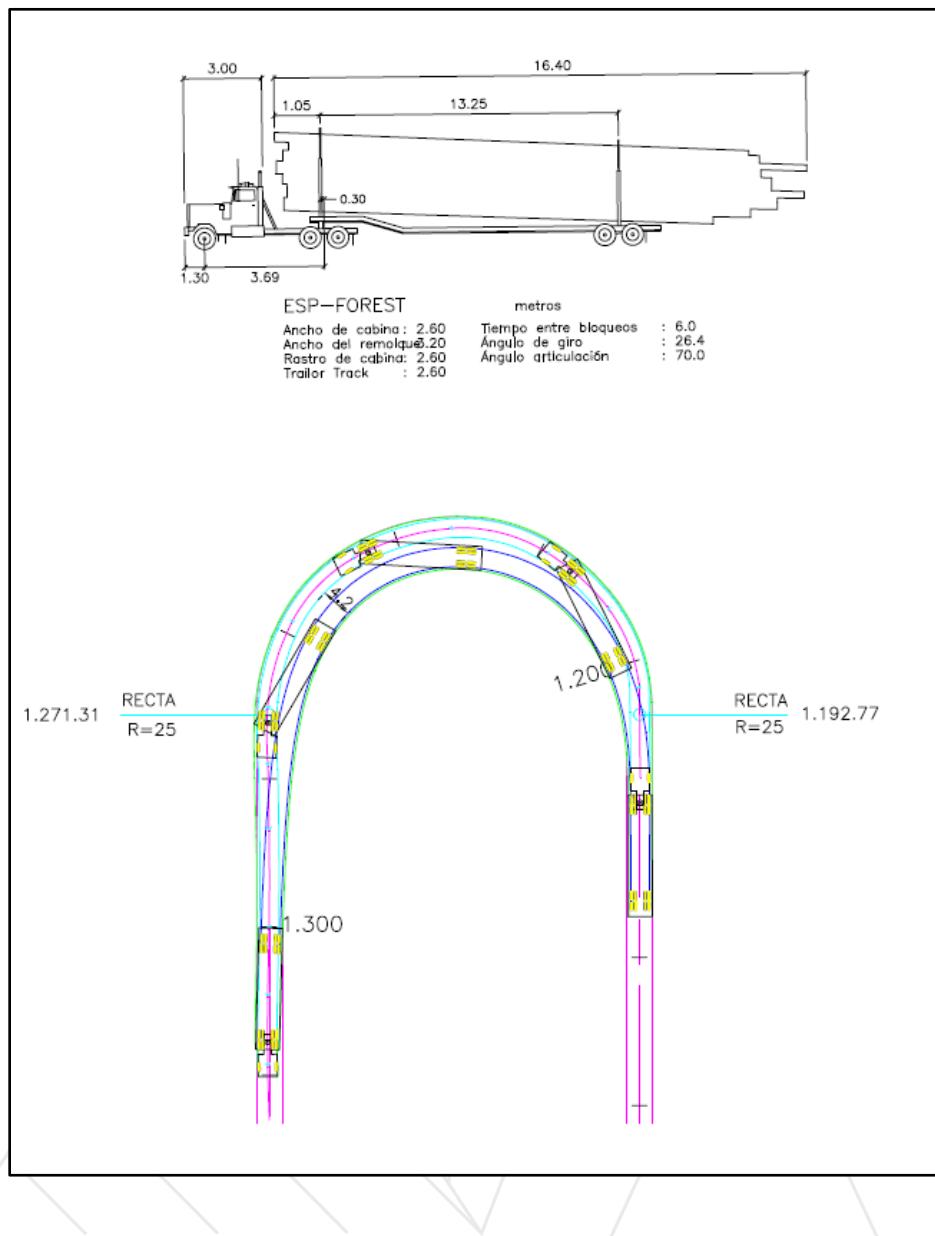
Ejes en 90°; radio de curva 60 m.



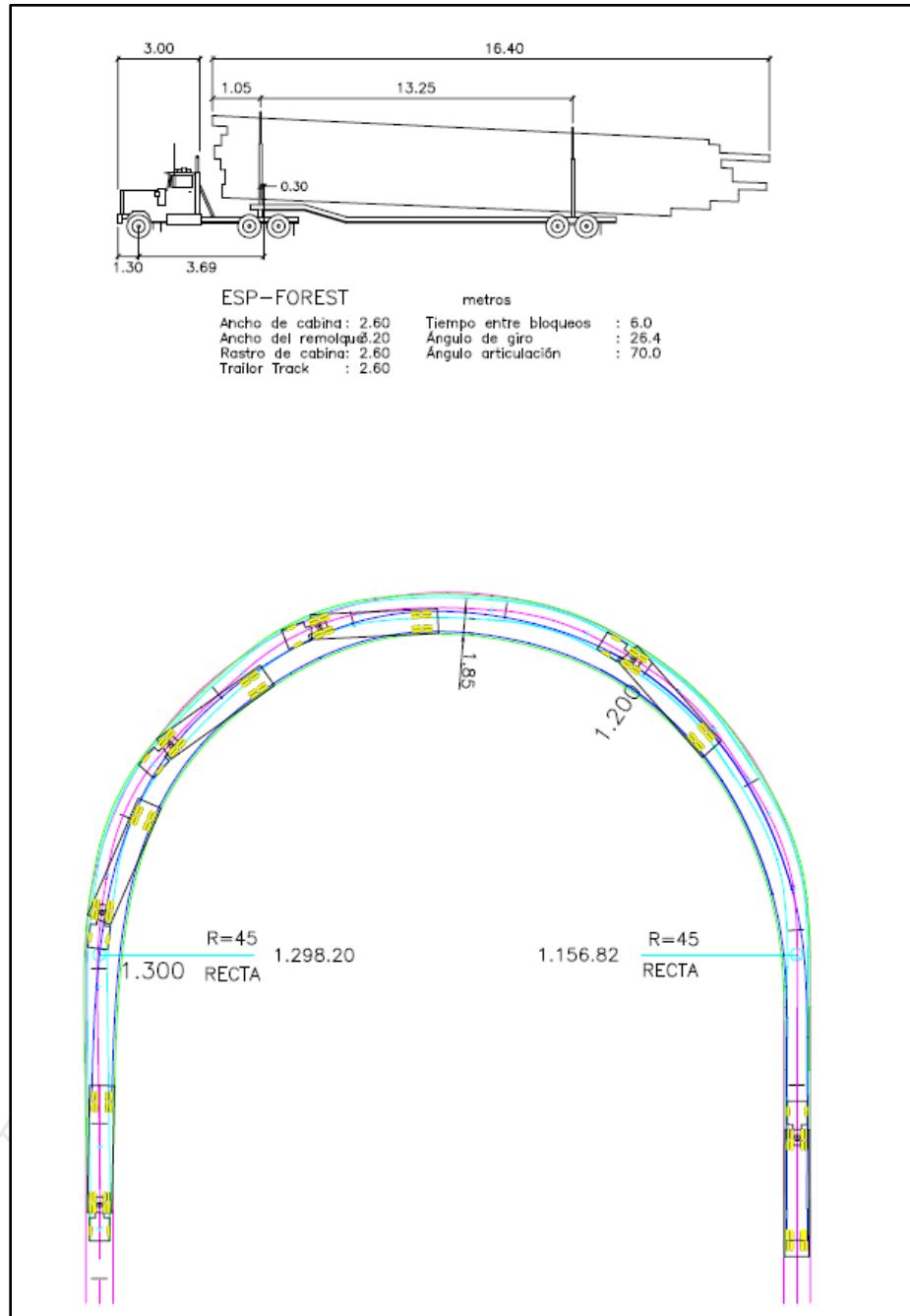
Ejes en 180°; radio de curva 15 m.



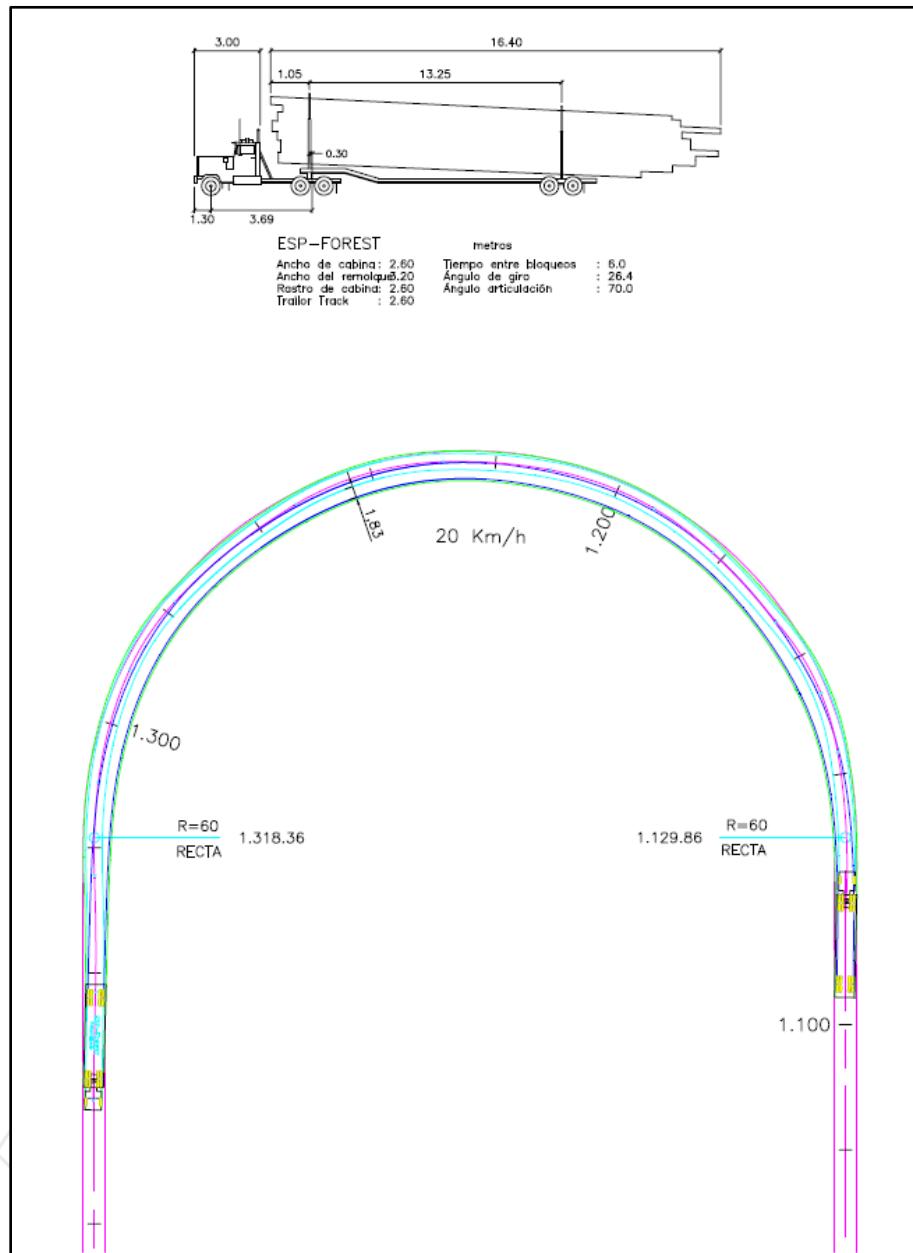
Ejes en 180°; radio de curva 25 m.



Ejes en 180°; radio de curva 45 m.



Ejes en 180°; radio de curva 60 m.



## ANEXO 2: Memorias de Cálculo de Diseño

### Método de diseño

Las cartillas fueron diseñadas utilizando un método empírico-mecanicista. El método consiste en primero caracterizar los materiales mediante los módulos elásticos y las cargas de tránsito. Para determinar las propiedades mecánicas de los materiales se utilizaron en forma conjunta las ecuaciones propuestas por la metodología Shell (1978) y AASHTO (1993), mientras que para determinar las cargas de tránsito se utilizaron las características de los camiones de Forestal Arauco.

Para el análisis estructural se utilizó un programa elástico-lineal multicapas que permite estimar las tensiones y deformaciones en distintos puntos de las capas del camino. Estos parámetros posteriormente se utilizan en las ecuaciones de fatiga o transferencia para estimar el número de repeticiones de carga o capacidad de soporte. Posteriormente comienza un proceso iterativo donde se ajusta el espesor de forma tal que los ejes equivalentes o volumen de madera requerido sea muy similar a lo que resiste el camino.

La secuencia de análisis se presenta en la Figura 55.

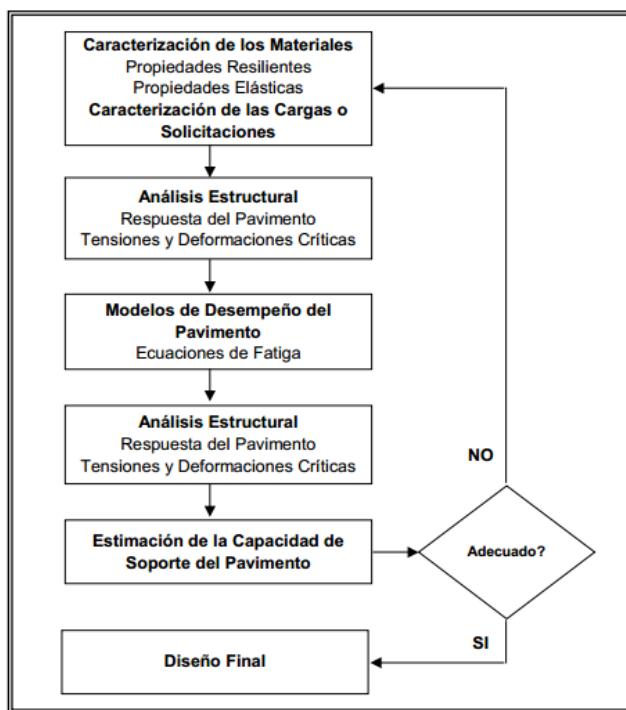


Figura 55: Metodología diseño empírico-mecanicista

## Hipótesis de Diseño

Para el desarrollo de las cartillas se realizaron diversas hipótesis de diseño, las cuales son consistentes con el contexto y condición operativa de los caminos forestales.

## Tránsito y Cargas de Diseño

Como se mencionó anteriormente la configuración adoptada para los camiones fue de cuatro ejes que consisten en un eje simple rueda simple (ESRS), un eje doble rueda doble (EDRD), y dos ejes simples rueda doble (ESRD). Para tomar en cuenta los distintos ejes se convirtieron a ejes estándares mediante factores de conversión ampliamente conocidos y utilizados en Ingeniería de Caminos. El eje estándar de 80 kN de peso se modeló considerando cuatro cargas de 20 kN por rueda y una presión de contacto entre rueda y superficie de rodado de 600 kPa.

## Conversión de Volumen de Madera a Ejes Equivalentes

Para la transformación de metros cúbicos de madera a ejes equivalentes (EE), se calculó el factor de eje equivalente (FEE) de cada eje utilizando la combinación de ejes de los camiones mencionados anteriormente con la siguiente ecuación:

$$\text{Factor EE} = \left( \frac{\text{Peso del E}_i}{\text{Peso del eje estandar}} \right)^n$$

El peso de eje estándar está definido y tabulado en la literatura técnica, mientras que el peso  $E_i$  es el peso total distribuido en cada eje.

Posteriormente cálculo la capacidad de metros cúbicos que puede transportar un camión por viaje, para encontrar el factor de conversión que corresponde a:

$$\text{Factor} = \frac{\text{EE total por camión}}{\text{Volumen de madera por camión}}$$

## Confiabilidad

Los caminos forestales son considerados de bajo tránsito (menor a 400 vehículos día), pero con un alto nivel de cargas. Normalmente este tipo de caminos operativos se diseñan con una confiabilidad de un 50% de acuerdo a recomendaciones de AASHTO (1993) y al método de diseño sudafricano empírico-mecanicista (1996). Por este motivo, es importante que durante la operación forestal se realicen evaluaciones periódicas de la condición del camino de forma tal que se eviten deterioros significativos, realizados acciones de mantenimiento preventivo en vez de reactivo.

## Relación entre CBR y Módulo Elástico

Uno de los parámetros más sencillos y comunes de obtener en terreno es el CBR, debido a la simplicidad de los ensayos necesarios para su obtención (CBR, cono de penetración dinámico). No obstante, el método empírico-mecanicista de diseño utiliza el módulo elástico para caracterizar la subrasante o plataforma. La obtención del módulo elástico se obtiene con las ecuaciones del Manual de Carreteras de Chile (2016):

$$M_r(\text{MPa}) = 17,6 * (\text{CBR})^{0,64} \quad \text{CBR} < 12\%$$

$$M_r(\text{MPa}) = 22,1 * (\text{CBR})^{0,55} \quad 12 \leq \text{CBR} < 12\%$$

en donde:

- $M_r$  = Módulo de la subrasante MPa.
- CBR = CBR de la subrasante en %.

En la cartilla N° 1 MNS1TO se observa cómo se realiza la conversión de CBR 1% a módulo de 18 MPa a través de esta ecuación.

Debido a que los métodos empírico-mecanicistas utilizan el módulo elástico para el diseño, es recomendable realizar mediciones en terreno con deflectometría liviana (LWD). Este equipo es capaz de calcular el módulo elástico de subrasante en forma directa.

Para considerar el efecto de la condición lluviosa en los diseños se consideró una reducción del 40% en el módulo elástico de la base, lo cual es un valor representativo de acuerdo con ensayos de laboratorio y terreno.

## Determinación de Módulos Elásticos

Para el cálculo del módulo de la base se utilizó la ecuación del método Shell (1978) la cual relaciona el módulo de la subrasante con un factor k que depende del espesor de la capa granular según la siguiente ecuación:

$$M_{\text{base}}(\text{MPa}) = k * M_{\text{sub}}(\text{MPa})$$

$$k = 0,2 * e(\text{mm})^{0,45} \quad 2 < k < 4$$

En donde:

M<sub>base</sub> = Módulo de la base en MPa.

M<sub>sub</sub> = Módulo de la subrasante MPa.

e = espesor de la base en milímetros

Una vez obtenidos estos parámetros se procedió a la utilización del software MePads de diseño (Theyse, 1996) para buscar el espesor de la estructura que permita cumplir con los EE de diseño, expresados en metros cúbicos de madera.

**Ejemplo:** En la Cartilla N°1 Monocapa Clima Normal, para la estructura MCNS2T0 (S2 2%<CBR<3%, T1<2500 m<sup>3</sup>) un espesor de base granular de 28 cm puede resistir según el método de diseño empírico-mecanicista un total de 1222 EE (2775 m<sup>3</sup> de madera). Esto cumple con el rango de tránsito T0 de 2500 m<sup>3</sup> de madera correspondiente a 1100 EE.

Para las cartillas de con mejoramiento se utilizó la ecuación de la AASHTO (1993) de módulo combinado, la cual relaciona el módulo de la subrasante con el de la capa de material mejorado, a la cual se le asignó un CBR de 13% en promedio, con el objetivo de simplificar el diseño.

$$\frac{1}{F} = \frac{0,125}{[0,0156 + h^2(\frac{M_m}{M_{\text{sub}}})^2]^{1/2}} * (1 - \frac{M_{\text{sub}}}{M_m}) + \frac{M_{\text{sub}}}{M_m}$$
$$M_c = M_{\text{sub}} * F$$

en donde:

- F = Factor de módulo combinado.
- M<sub>m</sub> = Módulo de la capa de mejoramiento en MPa.
- M<sub>sub</sub> = Módulo de la subrasante MPa.

## Diseño con Geosintéticos y Estabilización

Los diseños con geosintéticos se definieron en dos modalidades, para los suelos S1, S2 y S3 se diseñaron utilizando geomalla, la cual tiene un efecto de aumento en el CBR de la subrasante en aproximadamente un 7% según la experiencia y literatura técnica. Para suelos S4, S5 y S6 se optó por diseñar con un geotextil, el que tiene un efecto en el diseño de aumentar el CBR de la subrasante en 6%.

Las estructuras estabilizadas fueron diseñadas igual que las primeras dos cartillas, sin embargo, el CBR del rango S1 corresponde al CBR de S6, debido al aumento de las propiedades mecánicas producto de la estabilización, esto quiere decir que el nuevo CBR de S1 se encuentra entre un 5% y un 7%.

Para el diseño de las cartillas con bicapa se estimó una relación que aumenta en un 20% el espesor del diseño con monocapa y se distribuye en un 60% para la subbase granular y un 40% de la base granular, lo que permite asegurar que esa estructura cumplirá con las solicitudes.

Debido a que en estos dos últimos casos (estabilización y bicapa) se ocuparon diseños realizados anteriormente no se presentan las tablas de memoria de cálculo.



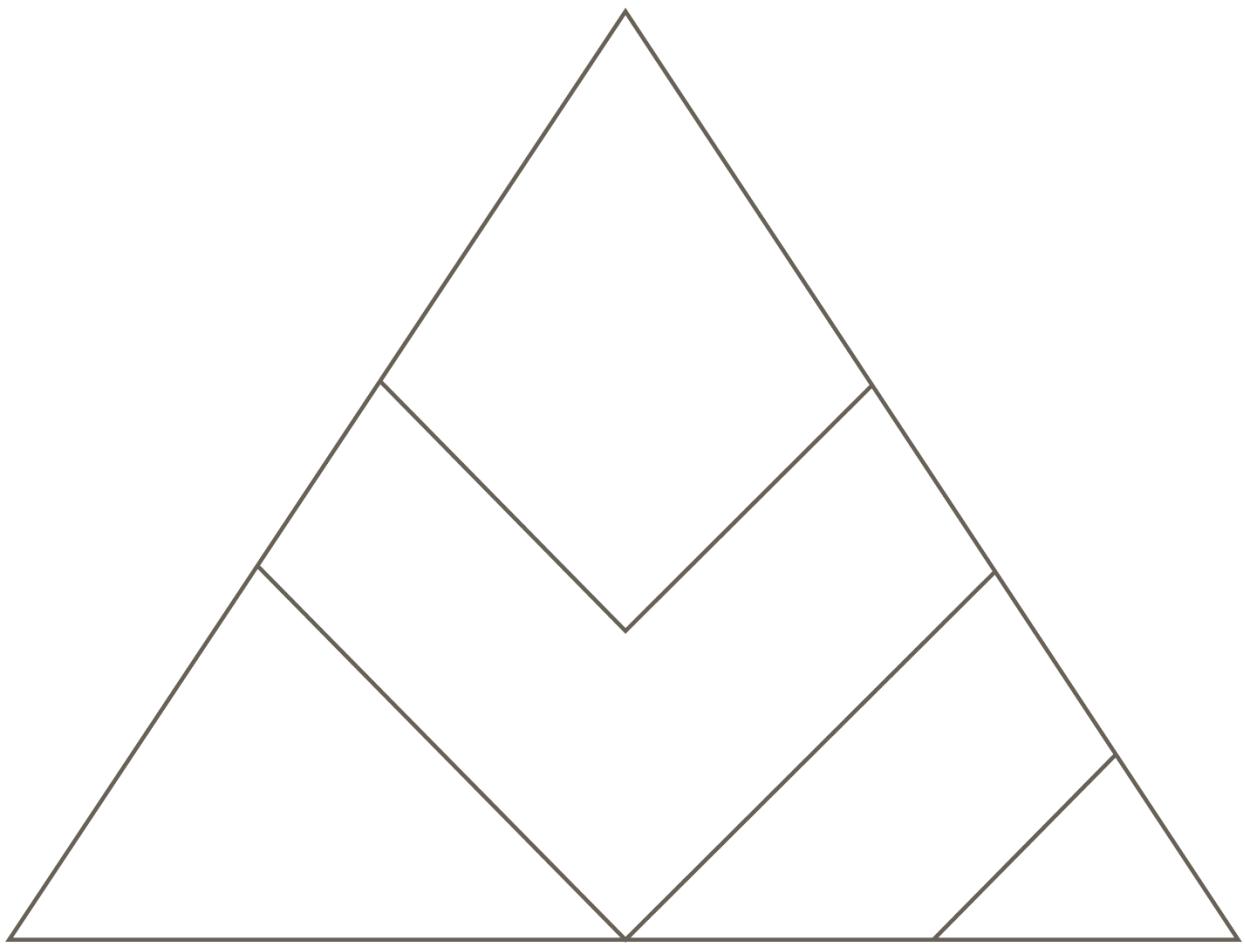


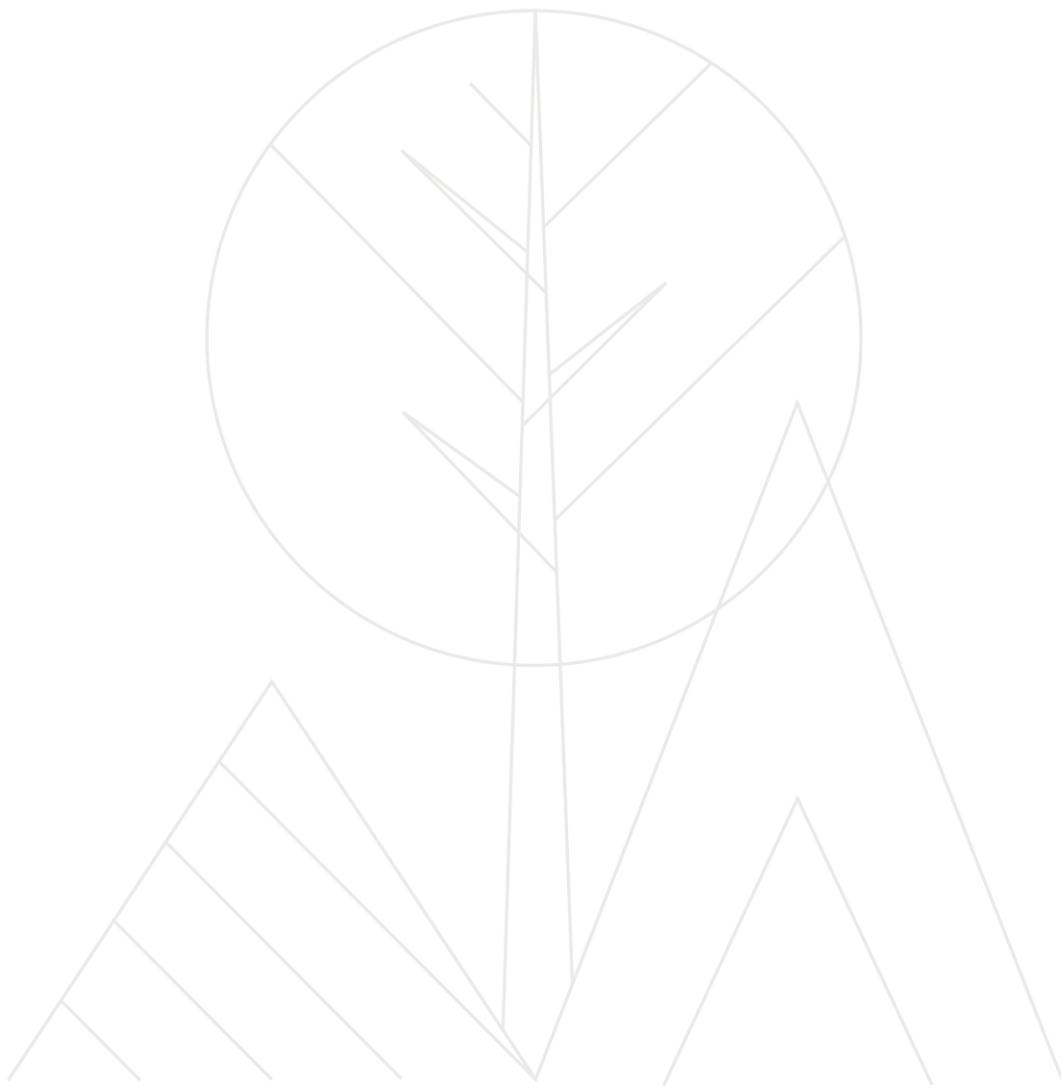














**arauco**

renovables para una vida mejor