

BLOQUE 3, U.D. 1, TEMA 2: PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE  
INFRAESTRUCTURAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE  
MADERA: TRAZADO Y DENSIDAD



**PROFESOR:**  
**EDUARDO TOLOSANA**  
**E.T.S.I. MONTES,**  
**2002-2003**

**BIBLIOGRAFÍA BÁSICA**

- **ANAYA, H. y P. CHRISTIANSEN.** "Aprovechamiento forestal. Análisis de apeo y transporte." Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José de Costa Rica, 1986.
- **KLEMENCIC, I. A.** "Special economic aspects in connection with road networks. The economic road standard, spacing and related questions". Symposium on the planning of forest communications networks (Ginebra). Vol. 2. 352 pp. Ed: FAO/ECE/LOG, 1970.
- **SEDLAK, O.** "General principles of forest road nets", en **FAO** "Appropriate wood harvesting in plantation forests". 282 pp. Roma, 1987.
- **SEGEBADEN, G., VON** "*Studies of Cross-Country Transport Distance and Road Net Extensions*". Rev. Studia Forestalia Suecica, N° 18. Ed. Royal College of Forestry (Estocolmo), 1964.
- **SUNDBERG, U. y C.R. SILVERSIDES.** "Operational Efficiency in Forestry. Volume I: Analysis". Kluwer Academy Publishers. Forestry Science Serie. 219 pp. Holanda, 1989.
- **TOLOSANA, E., V. M. GONZÁLEZ y S. VIGNOTE** "El Aprovechamiento Maderero". 575 pág. Coed. Fundación Conde del Valle de Salazar-Mundiprensa. Madrid, 2000.

## ESQUEMA

0. OBJETIVOS Y CLASIFICACIÓN DE LAS INFRAESTRUCTURAS:  
LAS PISTAS.

1. PRINCIPIOS DE DISEÑO Y TRAZADO.

2. CONCEPTO DE DENSIDAD ÓPTIMA.

### **0. INTRODUCCIÓN: OBJETIVO Y CLASIFICACIÓN**

#### **OBJETIVOS DE LAS DE INFRAESTRUCTURAS PARA EL APROVECHAMIENTO MADERERO:**

- **Permitir el acceso de los medios de transporte** (camiones) a las masas forestales.
- **Permitir o facilitar el acceso de los medios de saca** (básicamente tractores, también animales, cables o camiones todo terreno) a las masas forestales, evitando que transiten toda su superficie.

#### **TIPOS DE INFRAESTRUCTURAS PARA EL APROVECHAMIENTO MADERERO:**

- **Red básica** de pistas: para los medios de transporte, otros usos.
- **Red secundaria** de pistas: para camiones pequeños o tractores.
- **Calles de desembosque**: sólo para tractores.



**CALLE:** NO HAY MOVIMIENTO DE TIERRA, SÓLO SE ABRE UN CORREDOR ESTRECHO, SIGUEN LA MÁXIMA PENDIENTE.



**PISTA:** INCLUSO EN LAS MÁS SIMPLES, HAY MOVIMIENTO DE TIERRA, SIGUEN CURVAS DE NIVEL O NO TIENE PENDIENTES MUY FUERTES.

## CLASIFICACIÓN DE LAS INFRAESTRUCTURAS

### PISTAS FORESTALES

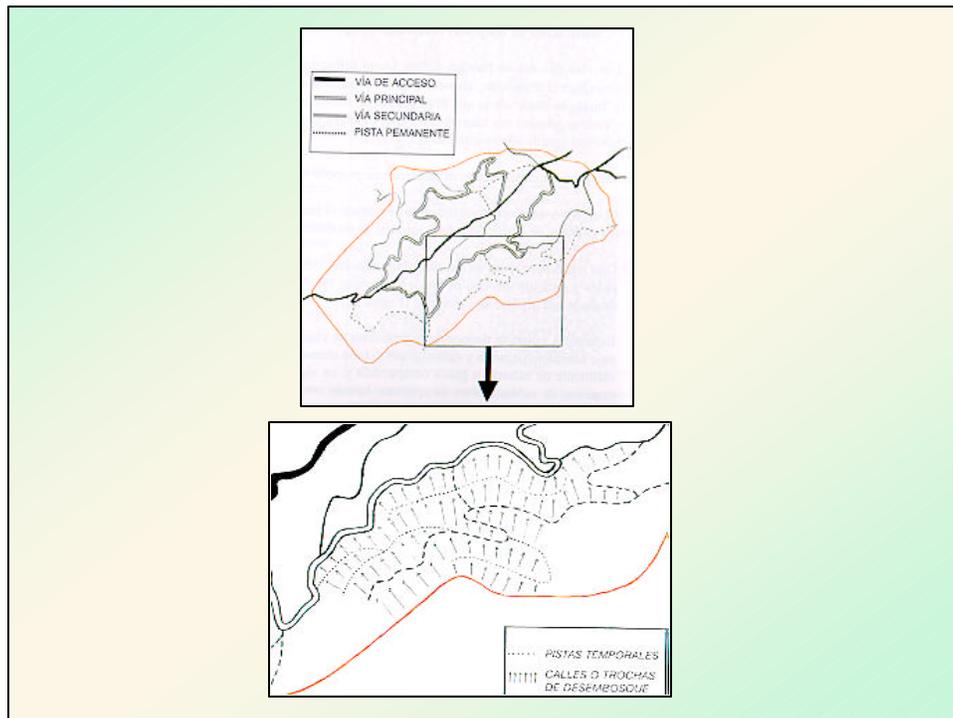
DENOMINACION	VEHICULO CARACTERISTICO	TRAZADO	PEND. MAX. (%)	ANCHURA EXPLANA-DA (m)	MOV TIE RR. AD- MISBLE	ALTURA MAXIMA TALUD	DRENAJE	BASE (cm)	SUBBA SE (cm)	CAPA RO- DADURA (cm)	AMORTI ZACIÓN (Años)
Vía o pista forestal de acceso o principal	camión	Curva nivel	12	4-7	Elevado	2,5-3	Completo	12-25	Opc	<5	25-50
Vía o pista forestal Secundaria	camión	Curva nivel	15	4-5	Moderado	2	Cunetas y Caños	12-25	Opc	No hay	15-30
Vía de saca o pista de desem- bosque	Camión t/ tractor	Curva nivel	30	3-4	Mínimo	1-1,5	Superficial o no hay	No hay	No hay	No hay	1-20

### CALLES DE DESEMBOSQUE

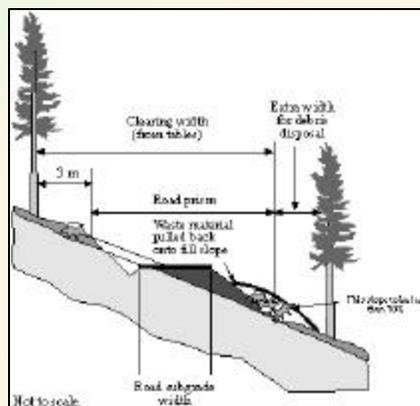
Calle de desem- bosque	tractor	Máx pend	60	No hay; 3-4 m. anchura	Nulo	No hay	1(*)				
------------------------	---------	----------	----	------------------------	------	--------	--------	--------	--------	--------	------

**Tabla 1: Clasificación de las vías de aprovechamiento forestal**

(\*) En realidad, no hay obras que amortizar. No obstante, las calles pueden emplearse en futuras cortas

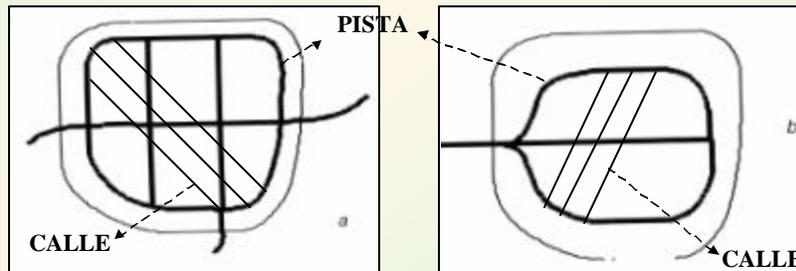


# 1.- DISEÑO Y TRAZADO DE LAS INFRAESTRUCTURAS: INFLUENCIA DE LA FISIOGRAFÍA



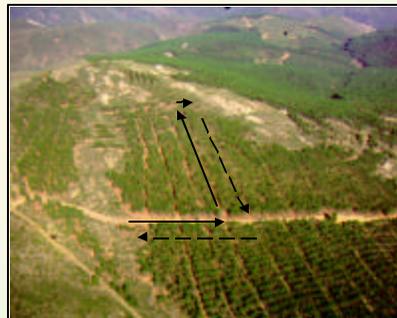
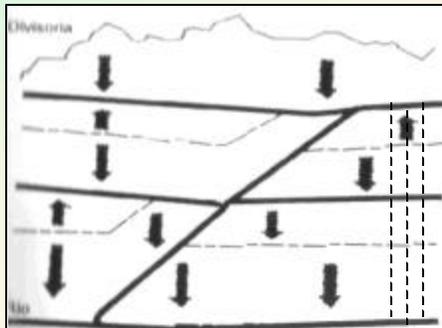
### TERRENO LLANO O CON PENDIENTES MUY SUAVES

- Red de **calles de tractor y pistas** de densidad variable.
- Las **pistas se trazan con un patrón uniforme**, con el principio de resultar homogéneamente distribuidas y aproximadamente paralelas, con ramales de conexión. Son accesibles en toda su longitud (sin taludes).
- **No son convenientes las pistas perimetrales.**
- Las calles **pueden insertarse oblicuamente** en las pistas, no se ven condicionadas a seguir líneas de máxima pendiente.

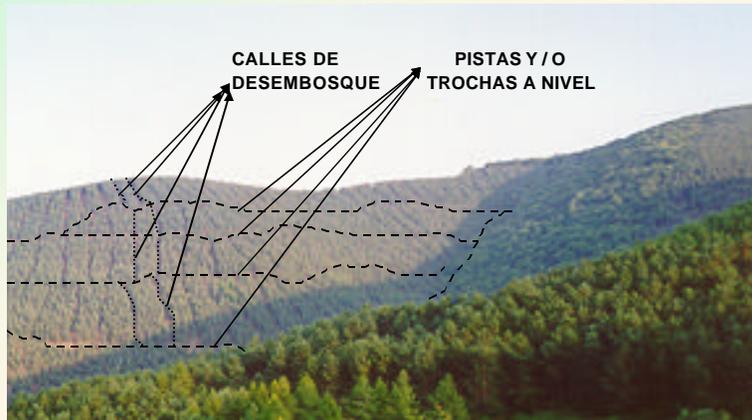


### PENDIENTE MODERADA Y RELATIVAMENTE REGULAR. (< 25-30%)

- Red de **calles de tractor y pistas** de densidad variable.
- Las **pistas se trazan aproximadamente en línea de nivel**, con ramales de conexión de mayor pendiente, y son accesibles en casi toda su longitud (taludes bajos).
- Los tractores se pueden desplazar por las calles **hacia arriba y hacia abajo**: es interesante que las calles tengan **salida por ambos extremos**.

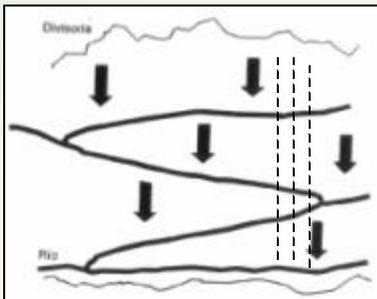


## INFRAESTRUCTURA PARA EL APROVECHAMIENTO DE MADERA: PENDIENTES MODERADAS.



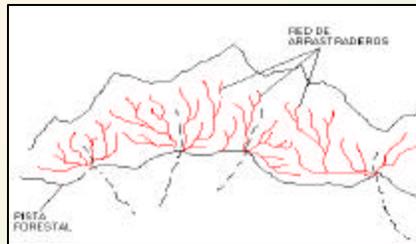
### **PENDIENTE MEDIA O ALGO IRREGULAR. (<35-40%)**

- Red de **calles de tractor y pistas** de densidad variable.
- Las **pistas se trazan con cierta pendiente (<15/20%)** para que los ramales de conexión no alcancen pendientes excesivas para los medios de transporte. Pueden no ser accesibles en toda su longitud (taludes de cierta altura).
- Los tractores se pueden desplazar por las calles **cargados sólo o preferentemente hacia abajo**: sigue siendo interesante que las calles tengan salida por ambos extremos, para evitar que suban vacíos marcha atrás.



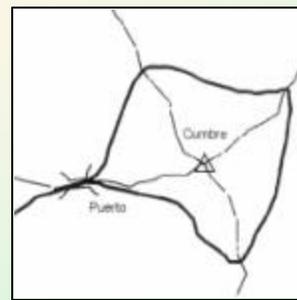
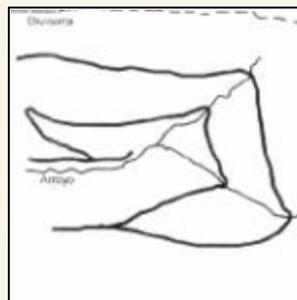
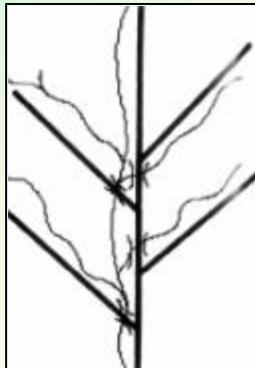
### **PENDIENTE MEDIA-ALTA Y/O IRREGULAR. (<50%)**

- **Límite para el uso de tractores** que entren en la masa forestal, normalmente **sólo tractores de arrastre**.
- **Red de arrastraderos irregular**, jerarquizada, condicionada por el relieve o por los puntos obligados de salida a pista.
- Los tractores se pueden desplazar **con carga sólo hacia abajo**: es frecuente que los atrastraderos sólo tengan salida aguas abajo.
- **Las pistas de transporte están muy condicionadas en su trazado**, suelen tener cierta pendiente (<15/20%) para que los ramales de conexión no alcancen pendientes excesivas. Sólo son accesibles en puntos de acceso forzado (normalmente, hay taludes altos). En ocasiones, las pistas de transporte son muy escasas y parte del desembosque se debe hacer por pistas temporales de mayor pendiente.



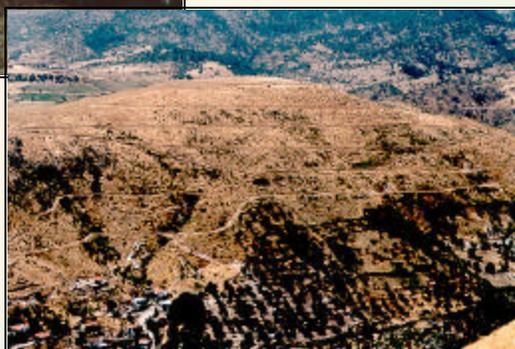
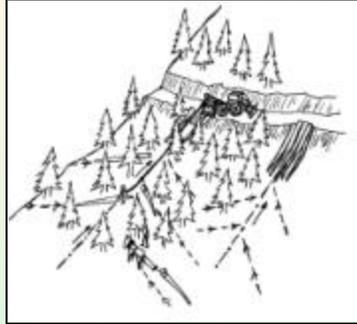
### **CASOS ESPECIALES: RECOMENDACIONES DE DISEÑO DE LA RED DE PISTAS EN PENDIENTES NO MUY ALTAS O IRREGULARES.**

- En **valles abiertos**, aprovechar vaguadas de cauces laterales o seguir un patrón en “espina de pescado”.
- En **cabeceras de cuenca o montañas aisladas**, seguir el principio general de trazar pistas aproximadamente paralelas y equidistantes, interconectadas.



**PENDIENTE MUY FUERTE Y/O MUY IRREGULAR. (>50%)**

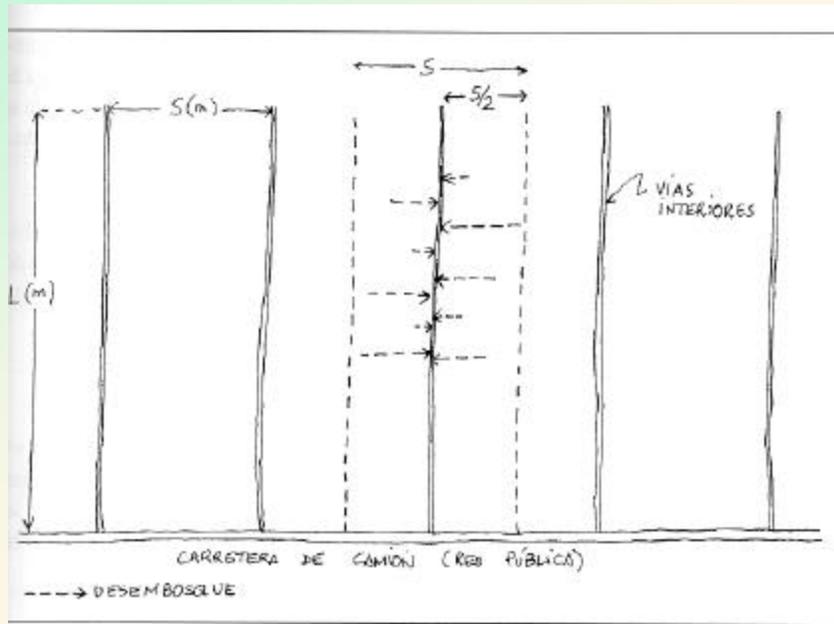
- Los tractores no pueden entrar en la masa, sólo trabajar desde pistas temporales o trochas: es el caso típico de deslizamiento hasta pistas (cortas a hecho, eucalipto) o cableado de árboles, fustes o pilas desde pista, o ambas cosas.
- Para el deslizamiento, no hay calles ni arrastraderos, para el cableado hay calles estrechas no muy separadas.
- La saca se produce, en el deslizamiento, hacia abajo, y en el cableado hacia arriba.
- Las pistas de transporte son escasas, hay una red de pistas temporales muy densa, condicionada por las distancias de cableado y/o de deslizamiento, que no suelen superar los 40 a 50 metros.



## 2.- DENSIDAD DE LA RED DE PISTAS DE TRANSPORTE: EL MODELO ECONÓMICO.

Para saca con tractor, adaptación del modelo de Von Segebaden adaptado por Klemencic, cuyas hipótesis de partida son las siguientes:

- el terreno, rectangular y homogéneo, está rodeado, en uno de sus límites, por una carretera de la red viaria pública, de la que parten ramales de pista forestal accesible a camión de transporte.
- estos ramales son paralelos y equidistantes, con una longitud  $L$  y una separación  $S$ , ambas en metros.
- la madera a extraer está homogéneamente distribuida en el interior del área objeto de aprovechamiento.
- el terreno no presenta dificultades fisiográficas, por lo que no hay direcciones preferentes ni problemas de salida a las pistas. Los tractores o animales se dirigirán, tras enganchar o cargar la madera, en línea recta hacia la pista más próxima, y por el camino más corto - perpendicularmente a la misma -.
- las pistas son accesibles a los camiones de transporte de la madera, por lo que el tractor se limitará a llegar a la pista y descargar en su borde la madera que transporta.



## RELACIÓN ENTRE DISTANCIA DE DESEMBOSQUE Y DENSIDAD DE PISTAS

La distancia de desembosque (ida, km) será nula en el borde de las pistas, y máxima - de valor  $D_{\text{máx}} = (S/2) \cdot 10^{-3}$  km - en el punto equidistante entre dos pistas. Dada la homogeneidad de la madera, la distancia media de desembosque (ida, en km) será,  $D_{\text{med}} = (S/4) \cdot 10^{-3} = 2,5 \cdot S \cdot 10^{-4}$ , de donde  $S \text{ (m)} = 10^4 \cdot D_{\text{med}} / 2,5$

La densidad de pistas forestales accesibles a los camiones, en metros lineales/ha, es  $Y = L / (S \cdot L \cdot 10^{-4}) = 10^4 / S$ , de donde  $S = 10^4 / Y$

Se puede así relacionar la distancia de desembosque con la densidad de vías:

$$D_{\text{med}} \text{ (km)} = 2,5/Y \text{ (m/ha)}$$

El tiempo de desplazamiento en el desembosque, para una cierta velocidad media  $v$  (km/hora), se obtiene de dividir la distancia a recorrer (dos veces la distancia de desembosque, pues es ida y vuelta) por dicha velocidad:

$$t_D \text{ (horas)} = 2 \cdot D_{\text{med}} \text{ (km)} / v \text{ (km/hora)} = 5 / (Y \text{ (m/ha)} \cdot v \text{ (km/hora)})$$

## COSTE UNITARIO DE DESEMBOSQUE

Si el coste horario de la máquina, incluido el personal, es  $C_h$  (€/hora), el coste por cada "viaje" es

$$C \text{ (€/ciclo)} = C_h \text{ (€/hora)} \cdot t_D \text{ (horas/ciclo)}$$

El coste directo del desembosque por unidad de producción (por ejemplo,  $\text{m}^3$ ) es suma de costes independientes de la densidad de pistas  $C'$  (€/ $\text{m}^3$ ), y los costes de desplazamiento calculados, que sí dependen de la densidad de pistas.

Para expresar estos últimos costes como unitarios (por  $\text{m}^3$ ), hay que dividir el coste por ciclo o "viaje" por la capacidad de carga media  $V_T$  ( $\text{m}^3$ /viaje) del tractor, según:

$$C_{\text{unitD}} = C' + C_h \cdot \{5 / (Y \cdot v \cdot V_T)\}$$

### **COSTE UNITARIO DE PISTAS**

Este no sería el único coste que depende de la densidad de pistas.

La apertura y/o mantenimiento de las pistas tiene también un coste directo que, si se parte de una densidad de vías  $Y_0$  (m/ha) ya existente y hay que construir pistas hasta un valor final  $Y$  (m/ha) y si los costes de construcción y mantenimiento de las pistas son  $P$  (€/metro lineal), mientras que los de mantenimiento son sólo  $P_0$  (€/metro lineal), como:

$$C_v = Y_0 \cdot P_0 + (Y - Y_0) \cdot P \quad \text{€/ha}$$

Este coste de vías se debe transformar, para poder valorar el coste conjunto, en términos unitarios - por unidad de producción, por ejemplo por metro cúbico -. Si se conoce el peso de corta ( $X$ , m<sup>3</sup>/ha), el coste unitario de pistas es:

$$C_{\text{mirv}} = \{Y_0 \cdot P_0 + (Y - Y_0) \cdot P\} / X$$

### **COSTES UNITARIOS CONJUNTOS QUE DEPENDEN DE LA DENSIDAD DE PISTAS**

$$C_{\text{unit}}(Y) = C' + C_h \cdot (5/Y \cdot v \cdot V_T) + \{Y_0 \cdot P_0 + (Y - Y_0) \cdot P\} / X$$

El problema teórico consiste en calcular el valor de la densidad óptima de la red de vías de saca, es decir, el valor de  $Y$  que hace mínimos los costes conjuntos, para lo que se debe derivar e igualar a cero la función de costes, obteniéndose:

$$Y_{\text{opt}} (m / ha) = \sqrt{\frac{5 \cdot X \cdot C_{ht}}{P \cdot V_T \cdot v}}$$

Pero hay que introducir coeficientes correctores, dado que las hipótesis del modelo no se cumplen en la realidad (Klemencic)

La densidad de la red de pistas de transporte viene dada finalmente por la expresión de Von Segebaden modificada por Klemencic:

$$Y_{opt} (m / ha) = \sqrt{\frac{(k_1 + k_2) \cdot X \cdot C_{ht}}{P \cdot V_T \cdot v}}$$

En que se parte de una densidad de la red de pistas  $Y_0$  (m/ha) y se construye hasta  $Y_{opt}$  (m/ha), y

$C_h$  (€/hora) es el coste horario de la máquina.

$X$  (m<sup>3</sup>/ha) es la densidad de corta.

$V_T$  (m<sup>3</sup>/viaje) es la capacidad de carga media del tractor.

$v$  es la velocidad media (km/h) de los tractores durante el desembosque.

Los costes de construcción y mantenimiento de las pistas son  $P$  (€/metro lineal).

Finalmente,  $k_1$  y  $k_2$  son dos coeficientes de corrección dados por la Tabla:

#### VALORES DEL COEFICIENTE DE ESCABROSIDAD $k_1$

- 3: Terreno sin ninguna dificultad, llano y con el monte accesible a partir de toda la longitud de la pista
- 5: Dificultad media, terrenos con pendiente, escabrosidad y adherencia que condiciona ligeramente el recorrido del vehículo. Algunos puntos del monte no son directamente accesibles desde la pista
- 7: Dificultad alta. Terrenos con pendiente, escabrosidad y adherencia tales que condicionan mucho el recorrido del tractor. Existen puntos frecuentes en la pista desde donde poder acceder al monte, pero en los demás puntos no.
- 9: Dificultad muy alta. Terreno con pendiente escabrosidad y adherencia tales que condicionan totalmente el recorrido del tractor. Existen pocos puntos de la pista desde donde acceder al monte.

#### VALORES DEL COEFICIENTE DE REGULARIDAD EN LA DISTRIBUCIÓN DE PISTAS $k_2$

- 3: Montes llanos, con pistas paralelas, casi equidistantes
- 5: Montes ondulados, con pistas no paralelas pero homogéneamente distribuidas.
- 7: Montes muy ondulados, con muchos puntos de paso forzado para la distribución de pistas, que hacen que estén irregularmente distribuidas.
- 9: Montes muy quebrados, con pistas muy irregularmente distribuidas, incluso sólo perimetralmente.

Como se ha visto, por razones fisiográficas o de inexistencia de pistas el desembosque puede tener un sentido único (“**desembosque unidireccional**”): las distancias medias de desembosque se doblan y cambia la densidad óptima

$$Y_{opt}(m/ha) = \sqrt{\frac{2 \cdot (k_1 + k_2) \cdot X \cdot C_{ht}}{p \cdot V_T \cdot v}}$$

En los casos intermedios, es necesario hacer el cálculo pertinente.

En cualquier caso, es interesante **analizar la expresión en la dependencia de los diferentes parámetros**, deduciéndose que la densidad de pistas de transporte será menor a peores condiciones fisiográficas, a menor densidad de corta, a mayor velocidad de los tractores, menor coste horario y mayor capacidad de carga.

Si se quiere analizar la densidad de pistas para diferentes calidades (y costes) de las propias pistas, o para diferentes alternativas de medios de transporte, incluida la posibilidad de un transporte intermedio, existen **modelos de programación lineal**, aunque su aplicación práctica se restringe a aprovechamientos muy grandes y uniformes.

### **OBSERVACIONES AL MODELO DE VON SEGEBADEN**

- 1) Es válido para orientar acerca de la densidad óptima de la red de pistas “interiores” a las que salen los tractores o animales, pero no para las vías por las que se hace “transporte intermedio” hacia uno o varios cargaderos principales de camión. Tampoco indica la localización o tamaño óptimo de estos cargaderos.
- 2) Este modelo no puede proporcionar soluciones en aquellos esquemas en que las máquinas no entran en el monte, sino que trabajan desde las pistas de desembosque (cableo desde pista, cable aéreo de desembosque, deslizamiento hasta pista).
- 3) Este análisis de la densidad óptima de pistas sólo tiene en cuenta factores económicos directos del aprovechamiento, pero no los efectos ambientales desfavorables de las propias pistas e incluso las pérdidas de producción a que una densidad excesiva de pistas puede dar lugar

### **LA CALIDAD DE LAS PISTAS (I)**

El estándar de calidad de las pistas está condicionado básicamente por:

- el tipo de transporte que se decida emplear
- la mayor o menor distancia a recorrer en el interior de los montes
- la posibilidad de recurrir a transportes intermedios
- la necesidad de uso en épocas lluviosas

La calidad de vías de nueva construcción - o en la reforma de las existentes – dependerá finalmente de:

- la distancia de transporte a fábrica
- la distancia media a recorrer por pistas interiores
- el volumen total objeto de aprovechamiento
- el coste de mejora de la calidad de pistas, función de la fisiografía.

### **LA CALIDAD DE LAS PISTAS (II)**

4 alternativas posibles:

- no modificar la calidad y emplear los medios de desembosque para el transporte intermedio por pista (0).
- no modificar la calidad de pistas y emplear un camión pequeño para el transporte de la madera desde el interior del monte a la fábrica (1).
- no mejorar la calidad de las pistas, sino emplear un camión pequeño o t/t como transporte intermedio y hacer un transporte por carretera con camión de gran capacidad (2).
- incrementar el estándar de calidad para posibilitar la entrada de un camión de gran capacidad en las pistas interiores (3),

### LA CALIDAD DE LAS PISTAS (III)

La influencia de los factores citados es la siguiente:

- si el volumen total de explotación es pequeño, caso en que la distancia a recorrer por pistas interiores no será probablemente muy grande, se ve favorecida la alternativa (0).
- las grandes distancias a fábrica favorecerán el uso de camiones de gran capacidad. Si el volumen de explotación es grande y las distancias a recorrer por pistas interiores también, será el coste de mejora de las pistas el que incline al ejecutor del aprovechamiento por las alternativas (2) o (3).
- si las distancias a fábrica son pequeñas, dependiendo del estado de las propias pistas y del coste de su mejora, las alternativas más interesantes serán las numeradas como (0) y (1). La alternativa (2) suele quedar descartada, siendo preferible casi siempre mejorar ligeramente las pistas interiores para su uso por el camión de transporte.

### VALORES ORIENTATIVOS DE DENSIDAD EN RELACIÓN CON LA CALIDAD

<b>DENSIDAD/CALIDAD DE PISTAS</b>	<b>FISIOGRAFÍA</b>		
	SUAVE /ONDULADO	MONTAÑOSO	MUY ABRUPTO
Densidad de pistas (m/ha)	36	26	32
Pistas principales y de acceso (%)	10	20	20
Pistas secundarias (%)	30	30	40
Pistas de saca (%)	60	50	40
Total	100	100	100

Fuente: Sundberg&Silversides, 1989.