

TRANSPORTE DE CAFE CEREZA POR CABLE AEREO DE GRAVEDAD

HENRY PARRA RODRIGUEZ¹
FERNANDO ALVAREZ MEJIA²
GONZALO ROA MEJIA³

RESUMEN

Con el fin de determinar los parámetros que gobiernan el transporte de café cereza por cable aéreo de gravedad, se construyó en el Centro Nacional de Investigaciones del Café "CENICAFE", un banco de pruebas con longitud de 38,5 m y de altura variable, para simular diferentes condiciones topográficas.

En el trabajo se determinaron las mejores combinaciones de flecha-pendiente que no requieran de ningún dispositivo de frenado de una carga de 60 kg, en el punto de descarga. Para pendientes mayores del 15% se debe implementar un sistema de amortiguación o control de la velocidad de las cargas. Flechas mayores al 6% no son recomendables para el sistema de transporte de café cereza por cable aéreo de gravedad, debido a la presencia

-
- ¹ Ingeniero Agrícola. Comité de Cafeteros de Santander Bucaramanga, Colombia. Apartado 16.
 - ² Profesor Asociado. Facultad de Ciencias Agropecuarias Universidad Nacional de Colombia, Seccional Medellín. Apartado 568.
 - ³ Ingeniero Electromecánico, Coordinador de Postcosecha del Centro Nacional de Investigaciones del Café, CENICAFE. Chinchiná - Caldas. Apartado 2427.

indeseable de una onda en el cable que distorsiona el descenso de las cargas.

Teniendo en cuenta los valores de flecha-pendiente anotados anteriormente, el diámetro mínimo del cable de acero recomendado para transportadores de gravedad, debe de ser " para longitudes de 300 m, por cada 120 m adicionales de longitud se debe aumentar el diámetro en 1/8 de pulgada.

La capacidad de transporte de café cereza en el banco de pruebas, enviando cargas de 60 kg, fue mayor a 5.000 kg de café cereza por hora para las diferentes combinaciones de flecha-pendiente experimentadas.

Palabras clave: transporte por cable, transporte de café cereza, capacidad de transporte.

ABSTRACT

TRANSPORTATION OF THE CHERRY COFFE BINS FOR CABLE USING THE GRAVITY ABSTRACT

An experimental cable structure, 38,5 m long, with variable height, for transportation of small loads using the gravity, was constructed at the Centro Nacional de Investigaciones del Café, Chinchiná, in order to study the main design parameters..

Cable slopes of 10% and 12,5%, and cable deflections of 4% and 5% allowed the transportation of a load of 60 kg with zero velocity at the receiving end. For slopes higher than 15% and for any deflection, a shock absorber system was implemented to control the reception of the load.

The minimun cable diameter for the recommended slopes and deflections is inch (12,7 mm), for the first 300 m. For every 120 m of additional lenght, the diameter

cable should be increased by 1/8 of an inch (3,2 mm).

The transportation capacity of the cherry coffe bins, for the system tested, using 60 kg bags, was above 5.000 kg/hr, any combinations the slopes and deflections.

Key words: transportation for cable, transportation of the cherry coffe bins, transportation capacity.

INTRODUCCION

El rápido transporte de café cereza desde los sitios de recolección hasta la planta de beneficio es una operación decisiva en la conservación de la calidad de este producto de tan definitiva influencia en la economía del país. Esta labor de transporte tropieza con múltiples dificultades que le merman su eficiencia económica y técnica, incrementando los costos al productor. Entre estas dificultades se encuentran las condiciones topográficas de la gran mayoría de las fincas cafeteras ubicadas en la región andina, topografía que restringe la construcción de vías y trochas para el paso de vehículos y animales, utilizados tradicionalmente en el transporte del café cereza; la coincidencia, en la mayoría de las regiones cafeteras del país de la época de lluvias con la cosecha principal, y la concentración de esta en un corto período, dificulta el transporte del café cereza hasta la planta de beneficio, obligando al caficultor muchas veces a implementar sistemas de transporte en forma antitécnica. Esto trae como consecuencia, deterioro en la calidad final del producto beneficiado, lo que se traduce en menores precios de venta y en disminución de los ingresos para el productor.

Gómez (1988) en el estudio "Caracterización de casos de aplicación del transporte de materiales por cable", planteó que las condiciones topográficas de la zona cafetera del país permiten aprovechar una gran cantidad de energía potencial

utilizando cables aéreos de gravedad, presentando este sistema la posibilidad de mejorar el manejo del café en la postcosecha y así evitar algunas causas del deterioro en el producto procesado.

El transporte por cable aéreo de gravedad, consta de un cable de acero suspendido por dos apoyos y anclado a diferentes niveles al terreno (Figura 2). El cable por su propio peso y la tensión suministrada forma una catenaria, donde un dispositivo polea-gancho, se desliza por el cable transportando la carga.

Targuetta citado por Colmenares (1984) recomienda para la planificación de un transportador por cable aéreo lo siguiente:

1. plano topográfico: en relación con la topografía, se requiere un levantamiento a fin de determinar el área, ubicación de las construcciones, cercas y demás factores que pueden incidir en el diseño. Luego se establecen las características topográficas del terreno, las cuales están determinadas por la ubicación de los puntos de carga y descarga. De acuerdo a Anaya y Christiansen (1986) el plano topográfico se debe trabajar a una escala de 1:200, con el fin de determinar cual es el trazado del cable más conveniente tanto en la planta como en el perfil longitudinal,
2. selección del cable: en los transportadores aéreos de gravedad, la selección del cable debe ser la adecuada para garantizar que la instalación opere bajo excelentes condiciones de eficiencia y seguridad. Según Marks y Baumister (1978) cuando se selecciona un cable no es suficiente consultar la resistencia requerida bajo condiciones teóricas sino que adicionalmente, se debe tener en cuenta las condiciones dinámicas a las cuales será sometido el cable (aceleraciones,

desaceleraciones bruscas , impactos, etc.). Colmenares (1984) anota que un cable seleccionado debe cumplir con las siguientes características: resistencia suficiente para soportar la carga máxima con coeficiente de seguridad apropiado (Tabla 1), capacidad para resistir el desgaste, capacidad de oponerse a la distorsión y al aplastamiento, es decir ser capaz de resistir el abuso, además de ser resistente a la corrosión, amplitud para soportar flexiones repetidas sin que se rompan los alambres por fatiga del material.

Novitsky (1966) recomienda que para seleccionar el diámetro del cable, se debe estimar inicialmente un valor aproximado mediante fórmulas empíricas bajo condiciones de durabilidad, para después verificar este valor por tracción y flecha admisible. Targuetta y López (1960) anotan que el diámetro experimental está dado por:

$$d = 1,5 \times (w+v)^{0.5} \tag{1}$$

donde:

d : diámetro del cable (cm).

w : peso de la carga (kg).

v : peso del carro o porta cargas (kg).

TABLA 1. Factores mínimos de seguridad recomendados según equipos transportadores por cables.

| Tipo de Equipo | Factor de seguridad |
|------------------------------------|---------------------|
| Cables fijos (puentes) | 3 - 5 |
| Cables teleféricos | 3 - 5 |
| Elevadores eléctricos | 7 - 10 |
| Cables inclinados | 6 - 8 |
| Cables de grúas | 5 - 8 |
| Cables tractores | 5 - 7 |
| Cables para transporte de personas | 8 - 12 |

Fuente: Encocables, Manual de cables.

Para el cálculo de la deflexión o flecha del cable cargado existen fórmulas y trabajos experimentales. Según Novitsky (1966) la flecha total del cable portante está compuesta por la flecha producida por el peso propio del cable y la flecha suplementaria producida por la carga transportada:

$$F_t = F' + F'' \quad (2)$$

donde:

F_t : flecha total (m).

F' : flecha producida por el peso propio del cable (m).

F'' : flecha por la carga concentrada (m).

Bateman (1959) afirma que el peso del cable puede tomarse proporcional a su longitud proyectada y que al aceptar esta asunción el efecto sobre los resultados finales es mínimo. Esta aproximación ha permitido convertir el estudio de la catenaria en la ecuación de una parábola. P. Stephen, citado por Targuetta y López (1960) comparó las diferencias entre los valores exactos y los obtenidos con la parábola, concluyendo que éstos últimos son inferiores al 1,5%. Esta diferencia o error es menor a la que se obtiene utilizando el plano topográfico.

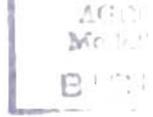
Para calcular las tensiones de un cable cargado y con extremos anclados, como lo muestra la Figura 1, se procede de la siguiente manera:

asumiendo la flecha máxima en s , se tiene:

$$T_h = \frac{w' \times s}{8 \times F_{max}} \quad (3)$$

$$w' = w + wc \quad (4)$$

$$\tan X = h/s \quad (5)$$



$$\tan B_1 = \frac{w \times s}{2 \times Th} + \tan X \quad (6)$$

$$T_{\max} = Th \times \text{Sen } B_1 \quad (7)$$

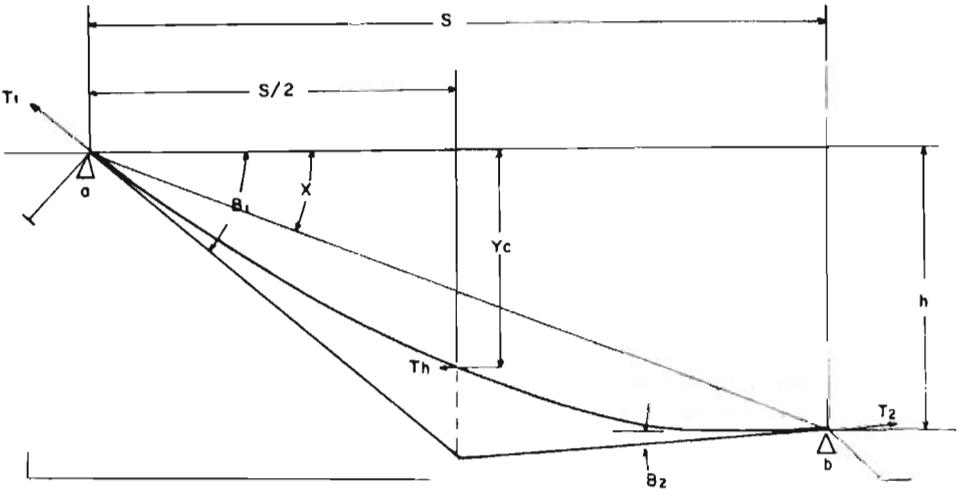


FIGURA 1. Cable uniformemente cargado y extremos anclados.

donde:

- w : peso por metro del cable (kg).
- w' : sumatoria de las cargas (kg)
- wc : peso de la carga con respecto a la cuerda.
- Th : tensión horizontal (kg).
- Tmáx : tensión máxima (kg).
- Fmáx. : flecha máxima (m)
- B1 : ángulo de la horizontal y la tangente en la carga
- B2 : ángulo de la horizontal y la tangente en la descarga

La distancia entre apoyos a que puede operar un cable aéreo de gravedad está limitada por la deflexión o flecha de la línea aérea. Zignoli, citado por Targuetta (1960) propone la siguiente ecuación:

$$L = \left[C + 1 + \frac{8}{3} \left(\frac{F_{\max} \times s}{C^2} \right)^2 \right] \quad (8)$$

$$C = (s^2 + h^2)^{1/2} \quad (9)$$

donde :

- L : longitud real del cable tendido (m)
 C : longitud de la cuerda (m)
 s : distancia horizontal entre los puntos(m)
 h : diferencia de altura entre los puntos (m)
 Fmáx : flecha máxima en s (m),

3. poleas: el diseño y la selección correcta del material con que se construyen las poleas es muy importante para el buen desempeño del cable. De acuerdo a la Union Wire Rope Corporation (1942) las poleas deben tener el diámetro máximo posible, pues la vida de un cable aumenta en proporción directa a estos diámetros. Como regla general se debe adoptar un perfil formado por el arco de una circunferencia de diámetro ligeramente mayor al del cable que se va a instalar con un ángulo entre polea y el cable de 135,
4. estructuras de apoyo: las torres son las estructuras de sustentación de los cables. Se construyen de metal, madera o de hormigón armado, y su altura es variable, llegando en algunos casos hasta 12 m de altura.

El presente trabajo se hizo con los siguientes objetivos:

1. determinar experimentalmente las mejores combinaciones de flecha-pendiente, para el diseño de transportadores de café cereza usando cable de gravedad,
2. estimar las pérdidas de energía que se presentan por el efecto de la fricción rodante-deslizante entre el

cable y polea, para aprovechar esa disipación de energía en el frenado de la carga,

4. determinar la capacidad de transporte de café cereza por unidad de tiempo, en la instalación utilizada para el experimento.

MATERIALES Y METODOS

El trabajo se realizó en el período de octubre de 1988 y diciembre de 1989, en predios del Centro Nacional de Investigaciones de Café, "CENICAFE".

Para el desarrollo de los objetivos del trabajo, fue construido un banco de pruebas para el transporte de café cereza, con una longitud de 38,55 m entre el punto de carga y descarga, y con diferencia de altura variable entre los puntos de carga y descarga (2 a 8 m).

El banco de pruebas del sistema de transporte tuvo el esquema general que se muestra en la Figura 2. El cable utilizado en el banco fue de acero preformado de paso regular derecho, con las siguientes características: cable Seale 6x19, diámetro de 12,5 mm ("), peso del cable 0,625 kg. m⁻¹, resistencia de los hilos 140 kg mm⁻², resistencia a la rotura 8.900 kg.

En los puntos de carga y descarga se construyeron dos columnas en ángulo de acero estructural de 1" x 1" x 1/8", sección transversal de 0,12 x 0,24m² y longitud de 3,0 m. Los elementos de unión o celosías de las columnas fueron construidas en varilla de 9,52 mm (3/8") colocadas con ángulo de inclinación de 45 y 63 grados con respecto a la horizontal.

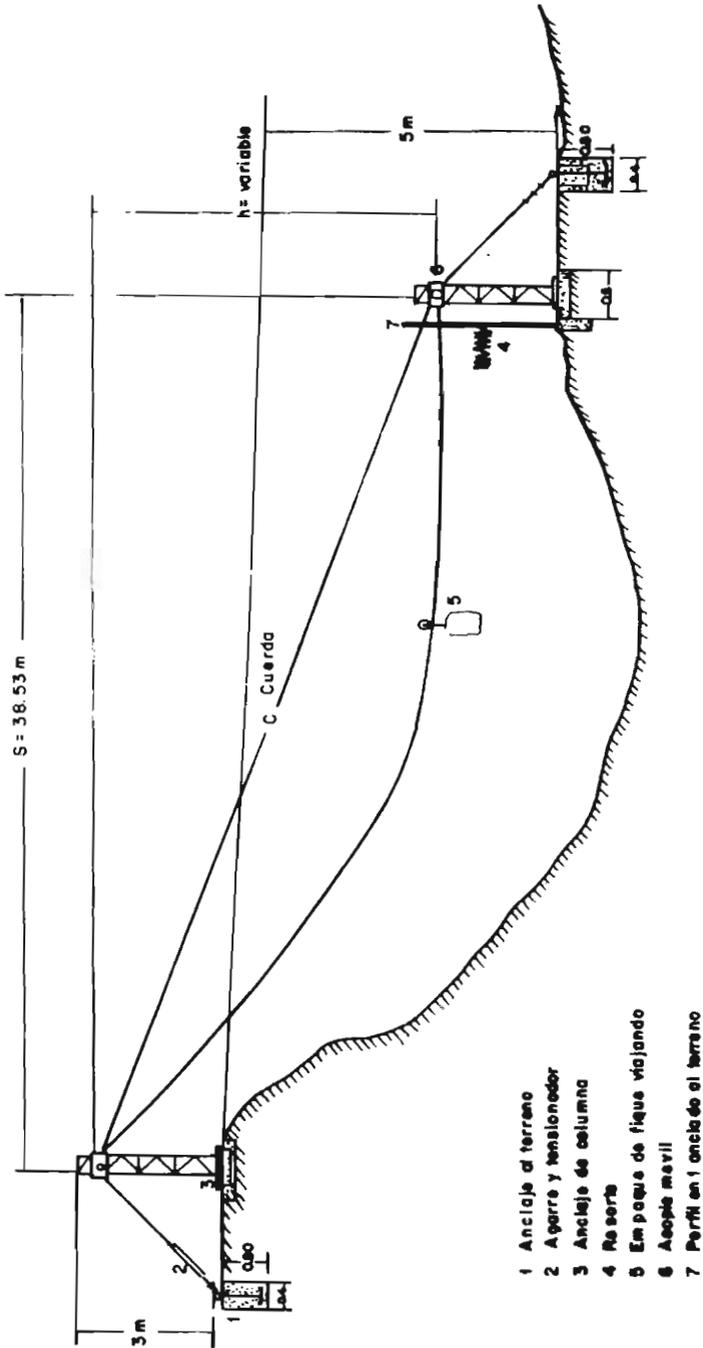


Figura 2. Esquema del banco de pruebas.

En las columnas se utilizó un acople móvil que permitió obtener diferentes puntos de apoyo del cable; este acople fue construido con dos láminas de hierro de 6,35 mm (") de espesor y sección transversal de 0,12 x 0,24 m² unidas por medio de dos tornillos de 19,05 mm.

Las columnas se fijaron al cemento por medio de dos chapas de hierro de 6,25 mm (") de espesor con sección transversal de 0,30 m, la chapa se sujetó al cemento por medio de tornillos, que se soldaron a las varillas que sobresalían de la malla del cemento.

En el punto de descarga se colocó a una distancia de 0,60 m de la columna un perfil en I de 4,70 m de longitud, anclado al suelo a una profundidad de 1,20 m, al perfil se instaló un resorte helicoidal, que mediante un mecanismo de aguja registró el desplazamiento que sufría el resorte, debido al impacto de las cargas de pruebas.

Para el transporte del material se construyeron dos poleas, con las siguientes características: material de construcción acero ref. 1020, diámetro mayor de 0,10 m, diámetro menor de 0,046 m

Se diferenciaban entre sí las dos poleas, en que a la primera se le colocó en la parte central un buje de bronce fosforado con diámetros externos de 0,028 m e interno de 0,0125 m, con éste buje se buscó una mayor disipación de energía por fricción. En la segunda polea se utilizaron dos rodamientos de bolas autolubricados, buscando con estos una menor disipación de energía por fricción.

El material a ser transportado se envió en sacos de fique, con cargas de 60 y 120 kg. Se escogió este tipo de empaque por ser el más usado para el manejo del café cereza.

Para determinar las combinaciones de las flechas y pendientes recomendables se realizaron las siguientes combinaciones:

1. con deflexiones de 4, 5, 6 y 8% de la distancia entre el punto de carga y el de descarga y pendientes seleccionadas de 5; 10; 12,5; 15; 17,5 y 20%, se efectuaron las combinaciones de todas las flechas con cada una de las pendientes. Se consideró que las mejores combinaciones flecha-pendiente serían aquellas con las cuales la carga llegara al punto de descarga con menor velocidad, es decir, que la energía de la carga en el punto de descarga tendía a cero,
2. para la determinación de la energía disipada por la fricción rodante-deslizante, se ensayó inicialmente con la polea sin rodamiento. Se envió la carga y en el punto de descarga, por medio del resorte helicoidal se registró el desplazamiento que éste sufrió a causa del impacto. La energía almacenada por el resorte se determinó con el uso de la siguiente ecuación:

$$E_{gr} = K \times X_m \quad (10)$$

donde:

- E_{gr} : energía absorbida por el resorte (N.m)
 K : constante elástica del resorte
 X_m : desplazamiento del resorte (cm).

Conocida la energía absorbida por el resorte se planteó una condición de equilibrio, basados en los principios de la cinemática. Este mismo procedimiento se

siguió con la polea que llevó rodamientos de bolas.

3. la capacidad de transporte de café cereza en el banco de pruebas, se obtuvo midiendo el tiempo que gastó la carga en llegar al punto de descarga.

Variables.

En las diferentes combinaciones se midió el tiempo de viaje, la velocidad promedio de descenso y el desplazamiento que sufría el resorte.

Análisis estadístico.

En el proceso de análisis de los resultados se empleó la siguiente metodología estadística:

Análisis de varianza de las variables, según esquema.

| Fuentes de variación | Grados de libertad |
|----------------------|--------------------|
| — Pendiente | — |
| — Flecha | — |
| — Pendiente - flecha | — |
| — Error | — |

RESULTADOS Y DISCUSION

El correcto diseño de las poleas y la profundidad adecuada de la garganta no permitió el descarrilamiento de las poleas, fenómeno que se presenta muy frecuentemente en éste tipo de instalaciones (Shigley y Mitcheell, 1985). El material seleccionado para su construcción no presentó desgaste significativo entre el diámetro inicial de la polea y el diámetro final (0,04 mm). El resultado anterior era de esperarse debido a que el material acero 1020 fue seleccionado con el criterio de evitar el desgaste por fricción en la polea.

El cable utilizado en el banco de pruebas no presentó ningún desgaste, ni rotura de los hilos que lo conforman, no obstante, al final de la experimentación se observó en el cable una alta corrosión.

SELECCION DE LAS COMBINACIONES FLECHA PENDIENTE

La Tabla 2, muestra los valores promedios del tiempo de viaje, para la carga de 60 kg, utilizando la polea con buje fosforado que se denominará polea 1 y los tiempos obtenidos con la polea con rodamientos que se denominará polea 2.

Con los datos obtenidos se observó la tendencia lineal negativa de la variable tiempo con respecto al factor de variación flecha-pendiente, es decir, que a una menor pendiente y menor flecha, se utilizó un mayor tiempo de viaje en el descenso de la carga, independientemente de la polea

Tabla 2. Valores promedios del tiempo de viaje en segundos, s, para la carga de 60 Kg, en las diferentes combinaciones de flecha - pendiente, usando ambas poleas.

| Pendiente % | Flecha | | | Pro.T.V.(1) | | C.V. % |
|----------------|--------|-------|------|-------------|-------|-----------|
| | 4 | 5 | 6 | 8 | s | |
| POLEA 1 | | | | | | |
| 10 | 11,91 | 9,85 | 8,60 | 8,49 | 9,71 | 14,52 |
| 12,5 | 9,63 | 8,26 | 8,47 | 8,04 | 8,60 | 7,67 |
| 15 | 7,12 | 5,39 | 6,37 | 6,27 | 6,29 | 24,16 |
| 17,5 | 5,75 | 5,26 | 5,24 | 5,13 | 5,35 | 5,04 |
| 20 | 5,03 | 4,87 | 4,70 | 4,54 | 4,81 | 4,57 |
| POLEA 2 | | | | | | |
| 5 | 13,23 | 11,19 | -- | -- | 11,71 | 7,25 |
| 10 | 9,33 | 8,49 | 8,53 | -- | 8,94 | 5,03 |
| 12,5 | 7,84 | 7,49 | 7,17 | -- | 7,50 | 4,80 |
| 15 | 6,36 | 6,04 | 5,75 | -- | 6,05 | 6,28 |
| 17,5 | 5,46 | 5,10 | -- | -- | 5,28 | 7,00 |
| 20 | 4,57 | 4,43 | 4,29 | -- | 4,43 | 4,96 |

(1) PRO. T.V.: Promedios del tiempo en segundos.

utilizada. Así mismo, la medida relativa de la dispersión de los datos (C.V %) de cada combinación, con respecto a la medida se considera normal, presentando el máximo valor (24,16%) para la pendiente del 15% con la polea 1. Para la flecha del 5% no se obtuvo la tendencia lineal observada en las demás combinaciones por el inadecuado agarre de la carga al gancho de la polea. Para evitar el anterior problema, se procuró asegurar siempre el bulto en la misma posición, o sea, balanceando aproximadamente los centros de gravedad de la polea y la carga.

Con la polea 2 y con flecha del 8% no se registraron valores del tiempo, debido al fenómeno del balanceo que se presentó al enviar las cargas. Sin embargo, con esta polea los tiempos de viaje a las mismas condiciones fueron menores que para la polea 1, encontrándose una diferencia entre los promedios, menores del 13%, diferencia que se explica porque el coeficiente de fricción para los rodamientos de bolas es menor que para el buje de bronce fosforado.

De acuerdo a los resultados anteriores para las dos poleas, se observa que independientemente de la pendiente, al aumentar la flecha, se presenta un menor tiempo de viaje, porque entre mayor sea la flecha más tendencia existe a presentarse caída libre, en la longitud del transportador.

Los promedios de la velocidad media ($m.s^{-1}$), obtenidos en las diferentes combinaciones de flecha pendiente con la carga de 60 kg y usando la polea 1 y la polea 2, se muestran en la Tabla 3 y se visualizan en la Figuras 3 y 4 respectivamente.

El análisis de varianza para las velocidades tuvo el mismo comportamiento que para el tiempo, o sea, la velocidad presentó diferencias significativas con respecto al factor variación flecha-pendiente.

TABLA 3. Valores promedios de la velocidad (en $m.s^{-1}$) de descenso para la carga de 60 kg en las diferentes combinaciones flecha pendiente usando ambas poleas.

| Pendiente % | Flecha | | | Pro.T.V.(1) | | C.V. % |
|----------------|--------|------|------|-------------|------|-----------|
| | 4 | 5 | 6 | 8 | s | |
| POLEA 1 | | | | | | |
| 10 | 3,24 | 3,91 | 4,49 | 4,57 | 4,05 | 13,58 |
| 12,5 | 4,02 | 4,65 | 4,56 | 4,87 | 4,52 | 7,30 |
| 15 | 5,40 | 5,53 | 6,07 | 6,22 | 5,80 | 6,37 |
| 17,5 | 6,79 | 7,46 | 7,52 | 7,74 | 7,38 | 5,00 |
| 20 | 7,83 | 8,10 | 8,44 | 8,7 | 8,23 | 4,57 |
| POLEA 2 | | | | | | |
| 5 | 3,14 | 3,44 | -- | -- | 3,29 | 7,60 |
| 10 | 4,12 | 4,31 | 4,53 | -- | 4,32 | 5,09 |
| 12,5 | 4,93 | 5,17 | 5,42 | -- | 5,17 | 5,02 |
| 15 | 6,06 | 6,41 | 6,74 | -- | 6,40 | 6,40 |
| 17,5 | 7,21 | 7,74 | -- | -- | 7,47 | 7,22 |
| 20 | 8,54 | 8,90 | 9,27 | -- | 8,90 | 5,61 |

(1) PRO. T.V: Promedios de velocidad de viaje.

El valor más alto para la velocidad de descenso de la carga con la polea 1 ($8.78 m.s^{-1}$), se obtuvo para la pendiente del 20% y flecha de 8%, así mismo el valor máximo de la velocidad con la polea 2 ($9.27 m.s^{-1}$), se presentó en la pendiente del 20% y flecha 6%, observando que independientemente de la polea utilizada, a medida que se disminuyó la flecha para la misma pendiente el valor de la velocidad se hizo menor. Con los valores anteriores se observa que la velocidad presenta tendencia lineal positiva, es decir a mayor pendiente y flecha, mayor es la velocidad, siendo lógico este resultado, ya que la velocidad es inversamente proporcional al tiempo de viaje.

De acuerdo con Targuetta y López (1960) la velocidad recomendada para este tipo de transportadores debe ser menor de $5 m.s^{-1}$. Los datos obtenidos con las pendientes del 10% y 12,55 en las flechas con la polea 1 para pendientes del

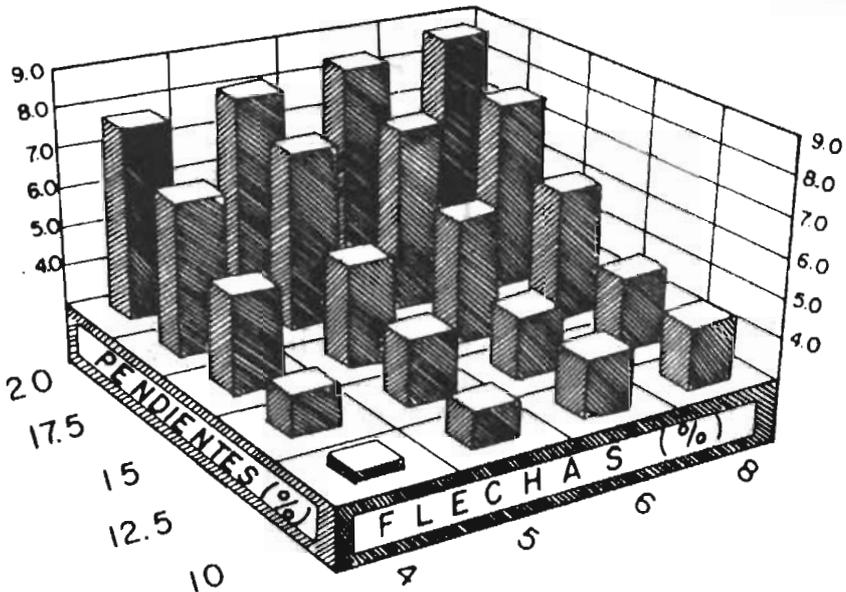


Figura 3. Variación de los promedios de la velocidad para la carga de 60 kg con las diferentes combinaciones de flecha-pendiente, utilizando la polea 1.

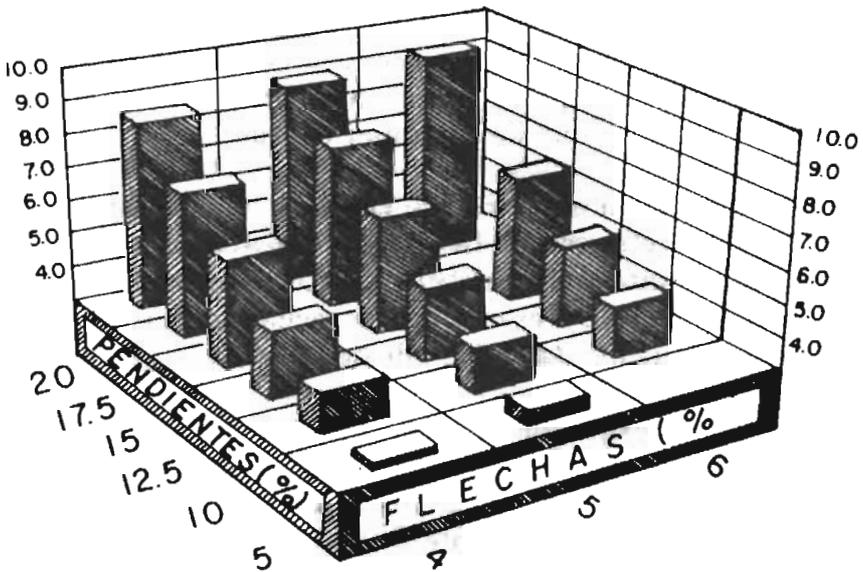


Figura 4. Variación de los promedios de la velocidad para la carga de 60 kg con las diferentes combinaciones de flecha-pendiente, utilizando la polea 2.

TABLA 4. Valores promedios del tiempo de viaje y velocidad de descenso para la carga del 120 kg, utilizando la polea 1.

| Pendiente % | Flecha % | Pro.T.V ⁽¹⁾ s | C.V. % | Pro.Vel ⁽²⁾ m/s | C.V % |
|----------------|-------------|-----------------------------|-----------|-------------------------------|----------|
| 12,5 | 4 | 10,46 | 15,6 | 3,79 | 15,8 |
| | 5 | 8,87 | 11,0 | 4,44 | 11,6 |
| 15,0 | 4 | 7,88 | 16,0 | 5,06 | 16,0 |
| | 5 | 7,24 | 14,2 | 5,49 | 12,8 |

(1) PRO TV : promedio de tiempo de viaje en segundos.

(2) PRO VEL: promedio de velocidad de descenso.

5% y 10% con la Polea 2, se encuentran por debajo de este valor de velocidad recomendado. Para las pendientes de 17,5% y 20%, usando ambas poleas, los valores obtenidos de las velocidades se encuentran muy cercanos al reportado en la literatura como crítico (10 m.s^{-1}).

La diferencia entre los valores de la velocidad de descenso para una misma pendiente a medida que aumenta la flecha, se debe a que el desplazamiento del bulto es semejante a la caída libre de cualquier cuerpo.

La catenaria que forma el cable sirve para disminuir la aceleración efectiva de la gravedad, o sea, la carga rueda hasta el punto más bajo de la catenaria con aceleración positiva, luego se presenta una desaceleración o aceleración negativa, que ayuda al frenado de la carga.

Con los resultados obtenidos, se puede observar que la tendencia de las variables (tiempo, velocidad) siempre es lineal negativa o positiva, determinando su comportamiento la dinámica del movimiento de los cuerpos. Además, con la polea 2 no se obtuvieron resultados positivos para los objetivos de este trabajo, debido a que para cualquier combinación de flecha-pendiente, se necesita un equipo de frenado para controlar la velocidad. Contrario a lo observado con la polea 1, que permite para la pendiente del 10% y 12,5 con

TABLA 5. Promedios de la capacidad de transporte ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$) de café cereza usando ambas poleas.

| Pendiente % | Flecha % | | | | \bar{X} capacidad de transporte $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ | C.V % |
|----------------|----------|------|------|------|---|----------|
| | 4 | 5 | 6 | 8 | | |
| POLEA 1 | | | | | | |
| 10 | 5159 | 5414 | 5595 | 5610 | 5446 | 3,43 |
| 12,5 | 5453 | 5636 | 5609 | 5676 | 5594 | 1,65 |
| 15 | 6067 | 5840 | 5937 | 5954 | 5950 | 7,10 |
| 17,5 | 6043 | 6125 | 6128 | 6148 | 6111 | 0,75 |
| 20 | 6164 | 6193 | 6232 | 6252 | 6205 | 0,63 |
| POLEA 2 | | | | | | |
| 5 | 5114 | 5243 | 5338 | -- | 5232 | 1,98 |
| 10 | 5492 | 5545 | 5605 | -- | 5547 | 1,15 |
| 12,5 | 5707 | 5761 | 5810 | -- | 5759 | 0,96 |
| 15 | 5940 | 5993 | 6042 | -- | 5991 | 1,05 |
| 17,5 | 6090 | 6154 | -- | -- | 6122 | 1,06 |
| 20 | 6247 | 6272 | 6299 | -- | 6972 | 0,64 |

flechas de 4% y 5%, la llegada de la carga con velocidad tendiendo a cero.

Para la carga de 120 kg, solo fue posible realizar experiencias con las pendientes del 12,5% y 15%, debido al incremento del balanceo en el cable. En la Tabla 4 se muestran los promedios del tiempo de viaje y velocidad de descenso para esta carga.

En la Tabla 4 se muestra que el tiempo de viaje presentó tendencia negativa y su máximo valor correspondió a la pendiente del 12,5% y flecha del 4%, esta misma tendencia se observa con la pendiente del 15%. La velocidad de descenso también presentó tendencia lineal positiva, es decir, a medida que aumentó la flecha, aumentó la velocidad, presentando su máximo valor ($5.49 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) para la pendiente del 15% y flecha de 5%.

La medida relativa de la dispersión de los datos (C.V.) de cada combinación con respecto a la medida siempre fue mayor al 10%, independientemente de la combinación fle-

TABLA 4. Valores promedios del tiempo de viaje y velocidad de descenso para la carga del 120 kg, utilizando la polea 1.

| Pendiente % | Flecha % | Pro.T.V ⁽¹⁾ s | C.V. % | Pro.Vel ⁽²⁾ m/s | C.V. % |
|----------------|-------------|-----------------------------|-----------|-------------------------------|-----------|
| 12,5 | 4 | 10,46 | 15,6 | 3,79 | 15,8 |
| | 5 | 8,87 | 11,0 | 4,44 | 11,6 |
| 15,0 | 4 | 7,88 | 16,0 | 5,06 | 16,0 |
| | 5 | 7,24 | 14,2 | 5,49 | 12,8 |

(1) PRO TV : promedio de tiempo de viaje en segundos.

(2) PRO VEL: promedio de velocidad de descenso.

cha-pendiente, presentando su máximo porcentaje (16%) para la pendiente del 15% y flecha del 5%, valores superiores a los obtenidos con la carga de 60 kg.

Para la carga de 120 kg, se encontró experimentalmente que la fuerza de fricción es mayor, debido a que la componente gravitacional también es mayor, presentándose en el transportador una flecha suplementaria, este aumento de la flecha hace que el balanceo se incremente apareciendo fuerzas que cambiaron las condiciones estáticas del cable, por lo tanto la carga pudo deslizarse normalmente.

CAPACIDAD DE TRANSPORTE

Los valores promedios de la capacidad de transporte presentada en el banco de pruebas con la carga de 60 kg y utilizando las poleas 1 y 2, son mostrados en la Tabla 5.

La capacidad de transporte respondió significativamente al factor de variación flecha-pendiente. Con la polea 1, el máximo valor (6.252 kg h^{-1}) se presentó para la pendiente del 20% y flecha del 8%, y el valor más bajo (5.159 kg h^{-1}), con la pendiente del 10% y flecha del 4%.

Así mismo utilizando la polea 2, se observa en la Tabla

5, que el valor más alto (6.299 kg h^{-1}), también correspondió a la pendiente del 20%, encontrando para el caso de esta última polea una diferencia entre la capacidad mayor y la menor del 12,5%. Estas diferencias de capacidad en las poleas permiten observar la tendencia lineal positiva de la

TABLA 5. Promedios de la capacidad de transporte (kg.h^{-1}) de café cereza usando ambas poleas.

| Pendiente % | Flecha % | | | | \bar{X} capacidad de transporte kg.h^{-1} | C.V % |
|----------------|----------|------|------|------|--|----------|
| | 4 | 5 | 6 | 8 | | |
| POLEA 1 | | | | | | |
| 10 | 5159 | 5414 | 5595 | 5610 | 5446 | 3,43 |
| 12,5 | 5453 | 5636 | 5609 | 5676 | 5594 | 1,65 |
| 15 | 6067 | 5840 | 5937 | 5954 | 5950 | 7,10 |
| 17,5 | 6043 | 6125 | 6128 | 6148 | 6111 | 0,75 |
| 20 | 6164 | 6193 | 6232 | 6252 | 6205 | 0,63 |
| POLEA 2 | | | | | | |
| 5 | 5114 | 5243 | 5338 | -- | 5232 | 1,98 |
| 10 | 5492 | 5545 | 5605 | -- | 5547 | 1,15 |
| 12,5 | 5707 | 5761 | 5810 | -- | 5759 | 0,96 |
| 15 | 5940 | 5993 | 6042 | -- | 5991 | 1,05 |
| 17,5 | 6090 | 6154 | -- | -- | 6122 | 1,06 |
| 20 | 6247 | 6272 | 6299 | -- | 6972 | 0,64 |

capacidad con respecto al factor de variación flecha-pendiente.

Comparando las capacidades para la flecha del 6%, entre las dos poleas, se presentó una diferencia máxima de (3,6%) con las pendientes del 12,5%, resultado lógico, debido a las condiciones de construcción de cada polea, ya mencionadas.

Con base en los resultados anteriores, para los transportadores por cable de gravedad, las capacidades están determinadas por la cantidad de carga que se arroje en cada viaje y por el tiempo que gaste la carga en llegar al punto de

descarga. En el caso de enviar cargas continuas, las condiciones estáticas del cable cambian, es decir, si dentro de la misma línea de transporte se colocan dos cargas, se forman en el cable tres catenarias que distorsionan el descenso de la carga. En el banco de pruebas al realizar este ensayo con dos cargas continuas y flechas de 5% y 6%, se presentó descarrilamiento de la segunda carga, impidiendo la llegada al punto deseado.

Según la información anterior, también se deduce que para una misma pendiente, pero diferentes flechas, la capacidad de transporte de café cereza es mayor para la flecha mayor, valor muy lógico porque a mayor pendiente, del terreno, mayor velocidad en el transporte de las cargas. En general, se obtuvo que independientemente de la combinación flecha-pendiente utilizadas en el banco de pruebas, las capacidades de transporte fueron mayores a 5.000 kg. h^{-1} , valor superior en un 120% al reportado en la literatura para este tipo de transportadores.

EFFECTO DE LA FRICCION EN EL FRENADO DE LA CARGA

El frenado de la carga en transportadores de gravedad, se realiza por efecto de la fricción entre el cable y los elementos móviles. De acuerdo a los objetivos se evaluaron los porcentajes de disipación de energía presentados con ambas poleas, con una carga de 60 kg. Los resultados son mostrados en la Tabla 6.

En la Tabla 6 se observa el efecto de la pendiente y la flecha sobre la disipación de la energía por el rozamiento presentado entre el cable-polea y buje-eje. La energía de disipación, calculada como la diferencia entre la energía potencial menos la energía de llegada ($E_c - 10$) en el punto de recibo, presenta con respecto a estas dos variables una tendencia lineal negativa, es decir a menor pendiente, mayor disipación de la energía y a mayor flecha menor disipa-

TABLA 6. Porcentajes de disipación de energía, utilizando ambas poleas

| Pendiente % | Flecha % | Energía ganada N.m | Energía de llegada N.m | Energía disipada % |
|-------------|----------|--------------------|------------------------|--------------------|
| POLEA 1 | | | | |
| 12,5 | 6 | 2.943 | 11,56 | 99,60 |
| | 8 | 2.943 | 29,94 | 98,98 |
| 15 | 4 | 3.531,6 | 243,77 | 93,09 |
| | 5 | 3.531,6 | 268,46 | 92,39 |
| | 6 | 3.531,6 | 299,00 | 91,53 |
| 17,5 | 8 | 3.531,6 | 245,34 | 93,05 |
| | 4 | 4.120,2 | 404,21 | 90,18 |
| | 5 | 4.120,2 | 458,99 | 88,86 |
| 20 | 6 | 4.120,2 | 497,75 | 87,91 |
| | 8 | 4.120,2 | 527,14 | 87,20 |
| | 4 | 4.708,8 | 714,55 | 84,82 |
| POLEA 2 | | | | |
| 5 | 4 | 1.177,2 | 56,28 | 95,21 |
| | 5 | 1.177,2 | 72,98 | 93,80 |
| | 6 | 1.177,2 | 76,90 | 93,46 |
| 10 | 4 | 2.354,4 | 248,91 | 89,42 |
| | 5 | 2.354,4 | 277,66 | 88,20 |
| | 6 | 2.354,4 | 307,98 | 86,91 |
| 12,5 | 4 | 2.943,0 | 377,32 | 87,17 |
| | 5 | 2.943,0 | 395,96 | 86,54 |
| | 6 | 2.943,0 | 424,77 | 85,56 |
| 15 | 4 | 3.531,6 | 620,36 | 82,43 |
| | 5 | 3.531,6 | 634,30 | 82,03 |

ción de la energía. Para la polea 1, el máximo porcentaje de disipación de la energía se presentó con la pendiente del 12,5% y flecha del 6 y 8%, y los porcentajes menores para la pendiente del 20%, encontrándose una diferencia significativa entre estos dos valores. Con el uso de la polea 2, la máxima disipación (95,21%), se presentó en la pendiente del 5% y la flecha del 4%. Los resultados de la disipación de energía con la polea 1, se determinaron por encima del 84%, debido a que la velocidad es menor con esta polea y a menor velocidad mayor disipación por fricción.

De acuerdo a la Tabla 6, se observa que con la polea 1, en la pendiente del 15%, la disipación de energía sigue el comportamiento normal, o sea, aumenta la disipación a medida que aumenta la flecha, pero con la flecha del 8% no se presenta este comportamiento, resultado que fue afectado por la posición de la carga con respecto al centro de gravedad. Si la carga no se ubica correctamente se presentan fuerzas laterales que aumentan la fricción entre polea y cable, causando un desgaste mayor en la canal de la polea. Con la misma polea 1, para las pendientes del 10% y del 12,5% y las flechas de 4% y 5%, la energía potencial fue igual a la energía disipada por fricción, con lo cual no se registró energía de llegada, o sea la carga llegó al punto de descarga con velocidad cero. Para la combinación de la pendiente del 5% con las diferentes flechas se observó que la energía ganada fue tan pequeña que no alcanzó a vencer la fuerza de fricción, por este motivo, las cargas no llegaron al punto de descarga.

Adicionalmente, en la Tabla 6, no se registran valores para la pendiente del 17,5% y 20%, utilizando la polea 2, debido a que la energía de llegada de la carga era tan alta, que el resorte no permitió las lecturas.

Con base en los resultados anteriores, se confirma lo anotado por varios autores: a mayor pendiente mayor velocidad, por lo tanto se presenta menor disipación de energía.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados y las condiciones en las cuales se llevó a cabo la presente investigación, se obtuvieron las conclusiones que a continuación se detallan.

En una misma longitud de transporte a medida que la flecha disminuye la tensión del cable aumenta.

Las combinaciones de flecha - pendiente recomendadas para transportadores por cable de gravedad, enviando cargas de 60 kg, son de 10% y 12,5% con flechas de 4% y 5%. Para pendientes mayores del 15%, se deben diseñar sistemas de amortiguación de la carga en el punto de llegada.

El diámetro mínimo del cable de acero para transportadores de gravedad, y de acuerdo a las combinaciones recomendadas anteriormente, es de 1/2", para longitudes hasta de 300 m y por cada 120 m adicionales, se debe aumentar el diámetro en 1/8".

Las flechas del 6% y 8%, no son recomendables para el diseño de sistemas de transporte de café cereza por cable de gravedad, debido al incremento de la onda indeseable y el balanceo del cable, que distorsionan el descenso de las cargas.

La capacidad de transporte de café cereza en el banco de pruebas, enviando cargas de 60 kg, fue mayor a 5.000 kg de café cereza por hora, independientemente de la flecha utilizada.

El transporte por cable aéreo de gravedad, no permite puntos intermedios de cargue, ni dos cargas transportándose al mismo tiempo.

Para la carga de 120 kg, no se encontró combinación de flecha - pendiente que permitiera un normal movimiento del café cereza, puesto que las flechas de diseño para esta carga deben ser menores del 4%.

El empaque utilizado tradicionalmente, permite transportar máximo 75 kg de café cereza, lo cual hace que el peso del 120 kg, en la práctica no sea manejado por el caficultor, ni por el recolector.

Los valores de disipación de energía por fricción para la polea que llevó bujes de bronce fosforado (polea 1), fueron mayores al 84%, obteniéndose que para las pendientes del 10% y 12,5% y flechas de 4% y 5%, la disipación de energía fue mayor al 82%, sin llegar a presentarse disipación del 100%, en ninguna combinación.

BIBLIOGRAFIA

ANAYA, H.G. CRISTIENSEN, P. Aprovechamiento forestal: análisis de apeo y transporte. San José Costa Rica: IICA, 1986. 246p.

BATEMAN, W.M. Cableways: handbook of heavy construction. New York: McGraw-Hill, 1959. 24p.

COLMENARES, R. Cálculo y diseño de un cable aéreo para el transporte recreacional de pasajeros. Bogotá, 1984. 120p. Tesis (Ingeniería Mecánica). Universidad Nacional de Colombia.

GOMEZ, P. Adolfo L. Caracterización de casos de aplicación del transporte de materiales por cable. Cali. s.n., 1988. 31p.

GONZALEZ, Huberto. Transporte forestal en cables aéreos de gravedad. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Recursos Forestales, 1974. 25p.

MARKS, L. y BAUMISTER, Theodore : manual del Ingeniero Mecánico. 2ed. McGraw-Hill. México: McGraw-Hill, 1978. 2v.

NOVITSKY, A. Transporte y extracción en minas y cielo abierto. Buenos Aires: Ed. Universitaria, 1966. p.255-309

PARRA R., Henry. Transporte de café cereza por cable aéreo

de gravedad. Bogotá, 1989. 140p Tesis (Ingeniería Agrícola). Universidad Nacional de Colombia.

SHIGLEY, J. y MITCHELL, L. Diseño en ingeniería mecánica. 4ed. México: McGraw-Hill. 1985. 541p.

TARGUETTA, A. L. y LOPEZ, R. A. Transporte y almacenamiento de materias primas. Barcelona : Blume, 1960. V.2, p.529-609.

UNION WIRE ROPE CORPORATION. Wire rope handbook: general office and factory. Kansas City, Mo. 1942. p.57-61